

Veli-Matti Yli-Kätkä

Tuulivoimalamelun mittaus ja mallinnus

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 18.9.2013.

Työn valvoja:

Prof. Vesa Välimäki

Työn ohjaajat:

TkT Seppo Uosukainen

DI Carlo Di Napoli

| | | |
|---|--------------|----------------|
| Tekijä: Veli-Matti Yli-Kätkä | | |
| Työn nimi: Tuulivoimalamelun mittaus ja mallinnus | | |
| Päivämäärä: 18.9.2013 | Kieli: Suomi | Sivumäärä:8+73 |
| Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos | | |
| Professori: Akustiikan ja äänenkäsittelyn ryhmä | | Koodi: S-89 |
| Valvoja: Prof. Vesa Välimäki | | |
| Ohjaajat: TkT Seppo Uosukainen, DI Carlo Di Napoli | | |
| <p>Tuulivoimalla tuotetun sähköön osuus sähköntuotannosta Suomessa on kasvussa. Tuulivoimaloiden toiminta tuottaa sähköä lisäksi myös melua. Tämän melun mittaamiseen ja mallintamiseen ei ole ollut Suomessa selkeää ohjeistusta. Nyt mallinnus- ja mittausohjeistus on kehitteillä.</p> <p>Tässä työssä tehdään tuulivoimaloiden melumittauksia perustuen kansainvälisiin käytössä oleviin mittausohjeisiin sekä mallinnetaan tuulivoimapuiston aiheuttamaa melua kahdella eri mallinnusmenetelmällä. Lisäksi mittaus- ja mallinnustuloksia vertaillaan keskenään. Tulokset osoittavat, että tuulivoimamelumittausten tekeminen vaatii hyvää suunnittelua ja tarkkoja sääennustuksia, jotta ohjeistuksen mukaiset mittausolosuhdevaatimukset täyttyvät. Tuulivoimamelumallinnuksissa puolestaan on tärkeää, että mallinnusohjelman käyttäjä tietää miten eri mallinnusparametrien valinnat vaikuttavat mallinnustuloksiin. Sopivilla parametrivalinnoilla mallinnustyökaluilla on mahdollista tuottaa melko hyvin mittaustuloksien kanssa yhteneväisiä mallinnustuloksia. Melumallinnusten käyttö on suositeltavaa, sillä niiden antama mallinnustarkkuus on parempi kuin mittaustulosten pohjalta yksinkertaisilla laskukaavoilla tehtyjen melulaskentojen tarkkuus.</p> | | |
| Avainsanat: akustiikka, akustiset mittaukset, melumittaukset, ympäristömelu, mittausohjeistus, melumallinnus | | |

Author: Veli-Matti Yli-Kätkä

Title: Measurement and Modeling of Wind Turbine Noise

Date: 18.9.2013

Language: Finnish

Number of pages:8+73

Department of Signal Processing and Acoustics

Professorship: The Acoustics and Audio Signal Processing group

Code: S-89

Supervisor: Prof. Vesa Välimäki

Advisors: D.Sc. (Tech.) Seppo Uosukainen, M.Sc. (Tech.) Carlo Di Napoli

The proportion of electricity produced by wind turbines is increasing. In addition to electricity, the wind turbines produce noise. In Finland, there are no current recommendations for wind turbine noise measurements and modeling. The guidelines are currently in the making.

In this thesis, wind turbine noise measurements are conducted based on international recommendations as well as wind farm noise modeling with two modeling methods. The measurement and modeling results are also compared with each other. The measurement results show that wind turbine noise measurements require good planning and accurate weather forecasts in order to fulfill the international recommendations of wind turbine noise measurement conditions. It is very important that the user of the wind turbine noise modeling program knows how the different parameters effect on the modeling results. It is possible to gain modeling results that are almost similar to measurement results by using the right parameterization. It is recommendable to use modeling program methods to calculate the wind turbine noise levels. The accuracy of these methods is better than the accuracy of the simple formulas calculating the immission noise levels straight from the emission noise level measurement results.

Keywords: Acoustics, Acoustic Measurements, Noise Measurements, Environmental Noise, Measurement Recommendations, Noise Modeling

Esipuhe

Haluan kiittää valvojaani Vesa Välimäkeä ja ohjaajiani Seppo Uosukaista ja Carlo Di Napolia hyvästä ohjauksesta. Kiitokset myös tuulivoimameluohjeistusprojektin ohjausryhmälle ja projektiryhmälle tuesta ja kannustuksesta. Kiitokset TuuliWatti Oy:lle, joka päästi minut tuulivoimapuistoonsa tekemään mittauksia. Iso kiitos Pirjo ja Markku Huhtalalle, jotka antoivat tehdä melumittauksia loma-asunnollaan ja yöpyä mökissään. Kiitokset Pöyry Oy:lle, jonka mittauskalustoa käytettiin emissiomittauksissa.

Haluan kiittää myös työnantajaani Ramboll Finland Oy:tä, joka on mahdollistanut diplomityön tekemisen työn ohessa ja antanut mallinnusohjelman ja mittalaitteet käyttöni tämän työn tekemiseen. Kiitokset Tampereen ympäristökonsultointiyksikön meluryhmälle tuesta. Erityiskiitokset Jussi Kurikka-Ojalle opastuksesta mittauksen kanssa, Arttu Ruhaselle mallinnusneuvoista ja Janne Ristolaiselle avusta koko työn mahdollistamisessa ja käynnistämisessä.

Espoo, 14.9.2013

Veli-Matti Yli-Kätkä

Sisältö

| | |
|---|------------|
| Tiivistelmä | ii |
| Tiivistelmä (englanniksi) | iii |
| Esipuhe | iv |
| Sisällysluettelo | v |
| Symbolit ja lyhenteet | vii |
| 1 Johdanto | 1 |
| 2 Tuulivoimamelun synty | 4 |
| 2.1 Mekaaninen ja aerodynaaminen melu | 4 |
| 2.2 Pyörivä äänilähde | 7 |
| 2.3 Äänilähteen suuntaavuus | 8 |
| 2.4 Pistelähdeoletus | 9 |
| 2.5 Amplitudimodulaatio | 10 |
| 2.6 Pientaajuinen melu | 13 |
| 3 Tuulivoimamelun eteneminen | 15 |
| 3.1 Geometrinen vaimentuminen | 15 |
| 3.2 Ilmakehän absorptio | 15 |
| 3.3 Maanpinnan vaimennus | 16 |
| 3.4 Tuulen vaikutus | 16 |
| 3.5 Ilmakehän lämpötila | 17 |
| 3.6 Turbulenssi | 18 |
| 3.7 Maanpinnan muoto | 19 |
| 3.8 Mallinnusmenetelmä ISO 9613-2 | 19 |
| 3.9 Mallinnusmenetelmä Nord2000 | 21 |
| 4 Tuulivoimamelumittaukset | 25 |
| 4.1 Emissiomittaukset | 27 |
| 4.2 Immissiomittaukset | 32 |
| 4.3 Amplitudimodulaatio | 37 |
| 5 Tuulivoimamelumallinnukset | 42 |
| 5.1 Olhavan tuulipuiston melumallinnukset | 43 |
| 5.2 Mallinnusmenetelmien vertailu | 44 |
| 5.3 Sääparametrien herkkyystarkastelu (Nord2000) | 49 |
| 5.4 Mittausten ja mallinnusten vertailu | 53 |
| 5.5 Mittaustuloksiin perustuvat melulaskennat | 58 |
| 5.6 Tuulivoimamelun mallinnuksen yleisiä käytäntöjä | 60 |
| 6 Johtopäätökset | 65 |

| | |
|--|-----------|
| Viitteet | 67 |
| Liitteet | 72 |
| A Terminologia | 72 |
| A.1 Äänenpainetaso | 72 |
| A.2 Ekvivalenttitaso eli keskiäänitaso | 72 |
| A.3 Aikapainotus | 72 |
| A.4 Taajuuspainotus | 72 |
| A.5 Äänitasomittari | 73 |

Symbolit ja lyhenteet

Keskeisimmät symbolit

| | |
|---------------|--|
| A | oktaavikaistan vaimentuminen lähteen ja vastaanottajan välillä |
| A_{div} | etäisyysvaimennus |
| A_{atm} | ilmakehän aiheuttama vaimennus |
| A_{gr} | tasaisen maanpinnan tai tasaisen rinteen aiheuttama vaimennus |
| c | äänennopeus |
| C | tuulivoimalan lavan jänteen pituus |
| C_0 | meteorologinen tekijä |
| C_{met} | meteorologinen korjaus |
| d | lähteen ja vastaanottajan välinen etäisyys |
| D | lähteen suurin dimensio tai tuulivoimalan roottorin halkaisija |
| d_0 | referenssietäisyys 1 metri |
| D_C | suuntaavuuskorjaus |
| d_f | Fraunhofer-etäisyys |
| d_p | lähteen ja vastaanottajan välinen etäisyys projisoituna maanpinnalle |
| f | äänen taajuus |
| F | voima |
| F_{BBN} | laajakaistaisen kohinan vaihteluvoimakkuus |
| f_m | modulaatiotaajuus |
| f' | koettu äänen taajuus |
| G | maavaimennuskerroin |
| H | tuulivoimalan napakorkeus |
| h_r | vastaanottajan korkeus |
| h_s | lähteen korkeus |
| $L_{A,ref,k}$ | taustamelukorjattu tuulivoimalan mitattu äänenpainetaso |
| L_{A5} | Keskiäänitaso, jonka 5 prosenttia mitatuista arvoista ylittää |
| L_{A95} | Keskiäänitaso, jonka 95 prosenttia mitatuista arvoista ylittää |
| $L_{Aeq,1s}$ | sekunnin välein tallennettu A-taajuuspainotettu keskiäänitaso |
| $L_{Aeq,10s}$ | kymmenen sekunnin välein tallennettu keskiäänitaso |
| L_{Amax} | terssikaistakohtaisen A-taajuuspainotetun keskiäänitason maksimiarvo |
| L_{Amin} | terssikaistakohtaisen A-taajuuspainotetun keskiäänitason minimiarvo |
| L_{eq} | keskiäänitaso eli äänen ekvivalenttitaso |
| L_{fT} | vastaanottopisteen oktaavikaistakohtainen A-painotettu keskiäänitaso |
| L_p | äänenpainetaso |
| L_R | pistelähteen tuottama keskiäänitaso vastaanottopisteessä |
| L_W | pistelähteen tuottama äänitehotaso oktaavi- tai terssikaistalla |
| $L_{WA,ref}$ | tuulivoimalan terssikaistakohtainen näennäinen äänitehotaso |
| m | modulaatiotekijä |
| M | Mach-luku |
| p | äänenpaine |
| R | mittausetäisyys |
| t | kulma lähteen nopeusvektorin ja lähde-vastaanottaja linjan välillä |

| | |
|-------------|--|
| T | keskiäänitason tallennusväli tai lämpötila |
| U | ilmavirtauksen nopeus |
| U_r | siiven pyörimisnopeus |
| U_w | tuulennopeus |
| v | nopeus |
| V_z | tuulennopeus 10 metrin korkeudessa |
| $V_{z,ref}$ | tuulivoimalan napakorkeudella mitattu tuulennopeus |
| z | korkeus maanpinnan yläpuolella |
| z_0 | maanpinnan karheustermi |
| z_{ref} | napakorkeus |
| α | kohtauskulma tai absorptiokerroin |
| θ | säteilysuunnan ja tulevan ilmavirran välinen kulma |
| λ | turbulenssin pyörrekoko tai säteilyn aallonpituus |
| μ | jänteen ja roottoritason välinen kulma |
| σ | maanpinnan tehollinen ominaisvirtausvastus |
| σ_r | karheusparametri |

Lyhenteet

| | |
|-------|--|
| FFT | fast Fourier transform |
| GPS | Global Positioning System |
| IEA | International Energy Agency |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| ISO | International Organization for Standardization |
| SCADA | supervisory control and data acquisition |

1 Johdanto

Tuulivoima on maailman nopeimmin kasvava uusiutuvan energian tuotantomuoto. Se on ympäristöystävällinen tapa tuottaa energiaa. Voimalat tuottavat sähköä saasteettomasti ja vähentävät fossiilisten polttoaineiden käyttötarvetta sähköntuotannossa. Suomessa tuulivoiman osuus sähkön kokonaistuotannosta on kuitenkin vielä pieni. EU:n ilmasto- ja energiapoliittisten velvoitteiden johdosta Suomen tavoitteena on nostaa uusiutuvan energian osuus energian kokonaiskulutuksesta 38 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä. Tavoitteiden mukaan tuulivoiman osuus kokonaiskulutuksesta olisi tällöin 6-7 prosenttia nykyisen noin 0,3 prosentin sijaan. Suomeen jo rakennetun tuulivoiman kapasiteetti on noin 200 megawattia, joka tavoitteiden mukaan kasvaisi tämän vuosikymmenen loppuun mennessä 2500 megawattiin ja arviolta noin 800 tuulivoimalaan [1]. Tällä hetkellä Suomessa on suunnitteilla tuulivoimaa lähes 9000 megawattia [2]. Suurin osa näistä tuulipuistoista on vasta alustavassa suunnitteluvaiheessa eikä niiden toteutuksesta ole vielä tehty lopullisia päätöksiä. Tuulisuudeltaan parhaita tuulivoimaloiden sijoitusalueita Suomessa ovat Lapin tunturit sekä meri- ja rannikkoalueet. Tyypillisimmillään maalle rakennettavat tuulivoimapuistot ovat teholtaan alle 30 megawatin ja lukumäärältään alle 10 voimalan puistoja. Näin toimimalla vältetään ympäristövaikutusten arviointimenettely [3]. Maalle sijoitettavien voimaloiden suurin yksittäinen keskittymä on Pohjanlahden rannikolla [4]. Tuulivoimaloiden energiantuotannon saasteettomuudesta huolimatta niiden toiminnalla on muita ihmisten ja eläinten elinympäristölle haitallisia vaikutuksia. Voimaloista aiheutuvat ympäristövaikutukset ovat riippuvaisia voimaloiden koosta, sijainnista sekä alueen käyttötarkoituksesta. [5]

Tuulivoimalan toiminta tuottaa ääntä, jota syntyy roottorin lapojen pyörimisliikkeestä sekä voimalan koneiston toiminnasta. Nykyaikaisten tuulivoimaloiden, joiden roottori sijaitsee ylätuulen puolella, tuottama ääni on laajakaistaista ja se sisältää pientaajuisia komponentteja sekä infraääniä [6]. Tuulivoimalan tuottama ääni on lapojen pyörimisliikkeen johdosta ajallisesti vaihtelevaa. Näitä pyörimisliikkeistä aiheutuvia jaksollisia komponentteja esiintyy etenkin pienillä taajuuksilla ja jopa infraäänialueella asti. Sääolosuhteet kuten tuulennopeus ja -suunta, turbulentsisuus sekä ilman lämpötila ja lämpötilagradientti vaikuttavat voimakkaasti tuulivoimalan tuottaman äänen syntyyn ja sen leviämiseen ympäristöön. Äänen leviämiseen vaikuttaa lisäksi ympäröivä maasto ja sen ominaisuudet kuten pinnan muodot, maaperän laatu ja kasvillisuus. Tuulivoimalan tuottama ääni sisältää pientaajuisia komponentteja, jotka voivat edetä pitkiäkin matkoja juurikaan vaimentumatta. Erityisesti pientaajuinen melu on tutkimuksissa havaittu häiritseväksi ja näin ollen myös hyvinvoinnille haitalliseksi [7]. Lisäksi pientaajuiset äänet etenevät usein helposti ulkoa sisälle juurikaan vaimenematta ja ne koetaan häiritseviksi etenkin yöaikaan, kun taustamelutaso on alhainen. Toinen tuulivoimalan tuottaman äänen häiritsevyyttä lisäävä seikka on pyörimisliikkeestä aiheutuva melun ajallinen vaihtelevuus eli amplitudimodulaatio [8]. Kaikkia sen syntymekanismia ei vielä aivan täysin tunneta ja on myös epäselvää millä tavoin sääolosuhteet vaikuttavat sen syntyyn [9]. Tutkimukset ovat osoittaneet, että mikäli henkilö hyötyy tuulivoimalasta taloudellisesti, hän ei koe sen aiheuttamaa ääntä yhtä häiritseväksi kuin henkilö, joka ei hyödy

voimalasta millään tapaa [8] [10]. Mikäli ääni on epämiellyttävää, häiritsevää, hyvinvoinnille haitallista tai muulla tavoin terveydelle vahingollista, on se melua [11]. Melun aiheuttamia haittoja pyritään yleisesti ennaltaehkäisemään äänen syntyyn ja etenemiseen sekä melutasoon ja -altistukseen kohdistuvilla toimenpiteillä. Ympäristöministeriö on heinäkuussa 2012 julkaissut tuulivoimarakentamisen suunnitteluun tarkoitetun oppaan, joka sisältää ohjeet tuulivoimaloiden meluvaikutusten arviointiin [5]. Lisäksi opas antaa suunnitteluun ohjearvot altistuvien kohteiden ulkomelutasolle. Oppaan mukaan meluvaikutusten minimoimiseksi on olennaista sijoittaa tuulivoimalat riittävän kauas asutuksesta ja muista meluvaikutukselle herkistä kohteista.

Tuulivoimamelun torjunnassa tavoitteena on toimia ennakoivasti suunnittelun keinoin [5]. Melumallinnus on tärkeä työväline suunniteltaessa uusien tuulipuistojen sijoituskohteita. Huolellisesti tehdyllä melumallinnuksella on mahdollista laatia arvio rakennettavien tuulivoimaloiden aiheuttamista melutasoista altistuvissa kohteissa. Suomessa ei ole ollut selkeää ohjeistusta siitä, miten tuulivoimamelun mallinnukset tulisi toteuttaa. Tästä syystä alan toimijat ovat tehneet mallinnukset hyväksi havaittujen käytäntöjen pohjalta käyttäen omaa harkintaansa. Tällöin tietynlaisiin mallinnustuloksiin pyrkiminen on joissakin tapauksissa saattanut ohjata mallinnuksessa käytettyjen parametrien ja asetusten valintaa. Lisäksi eri laskentamallien välillä on eroja säädettävissä parametreissa sekä niiden antamissa laskentatuloksissa. Tämä on johtanut siihen, etteivät eri ohjelmilla tai menetelmillä tehdyt mallinnukset ole olleet keskenään riittävän vertailukelpoisia.

Tämä diplomityö on tehty taustaselvityksenä Ympäristöministeriön, Energia- ja teollisuus ry:n ja Suomen Tuulivoimayhdistys ry:n rahoittamaan projektiin, jonka tavoitteena on ollut valmistella tuulivoimamelun mallinnus- ja mittausohjeistusta Suomessa. Projektin tavoitteena on ollut kehittää tuulivoimamelun mallinnukseen sovellettavien parametrien valintaohjeistus [12], joka mahdollistaa yhteneväiset käytännöt eri mallinnusohjelmistoja käytettäessä. Lisäksi projektin kuluessa on tuotettu mittaukseen Suomessa sovellettavien menetelmien ohjeistus [13], jota noudattamalla melumallinnuksen tulosten oikeellisuus voidaan mittauksin verifioida. Kehitetyt menetelmät perustuvat pitkälti olemassa oleviin kansainvälisiin ja kansallisiin standardeihin, ohjeistukseen ja menettelytapoihin. Ympäristöministeriö tulee myöhemmin antamaan varsinaisen ohjeistuksen hankkeessa tuotetun aineiston pohjalta.

Tämän työn tarkoituksen on ollut testata projektin kuluessa kehitettyjä mittausmenetelmiä käytännössä sekä selvittää, miten mallinnusohjelmien varioitavat parametrit vaikuttavat mallinnustuloksiin. Lisäksi työssä on tutkittu, millä parametrivalinnoilla eri mallinnusmenetelmissä on mahdollista saavuttaa mahdollisimman todenmukaisia sekä yhteneväisiä tuloksia. Työssä on keskitytty käsittelemään tasaiseen eli vain vähäisiä korkeuseroja käsittävään maastoon rakennettavien tuulivoimaloiden ominaisuuksia. Kumpuilevassa maastossa sijaitsevat mäet ja laaksot luovat omat haasteensa melumallinnuksille ja -mittauksille. Myös merelle rakennettavien tuulivoimaloiden tuottaman äänen leviämisen periaatteet eroavat tasaisen maan vastaavista. Esimerkkikohteena mittauksissa ja mallinnoissa on käytetty samaa tasaisessa maastossa sijaitsevaa tuulipuistoa, joten myös saatuja mittaus- ja mallinnustuloksia on voitu työssä vertailla keskenään.

Aihetta lähestytään ensin teoriaosuudella, jossa käsitellään tuulivoimamelun syntyyn ja etenemiseen keskeisesti liittyviä perusteita sekä melumallinnuksessa käytettyjen menetelmien toimintaperiaatteita. Tämän jälkeen työssä käsitellään tuulivoimapuistossa tehtyjä melumittauksia ja niiden tuloksia. Tavoitteena on ollut selvittää miten ohjeistuksen mukaiset mittausmenetelmät toimivat käytännössä ja miten mittausolosuhteet ja käytännöt vaikuttavat mittaustuloksiin. Työssä on myös tarkasteltu erilaisia menetelmiä, joilla voidaan analysoida amplitudimodulaatiota ja pientaajuista melua mittaustuloksista. Tämän jälkeen tässä työssä vuorossa on tuulivoimamelumallinnuksia käsittelevä osio, jossa käydään läpi kahden mallinnusmenetelmän keskenäistä vertailua, analysoidaan mallinnusohjelmissa varioitavien parametrien vaikutusta ohjelmien antamiin mallinnustuloksiin sekä lopuksi käydään läpi mittaus- ja mallinnustulosten vertailua. Mallinnusten tavoitteena on ollut selvittää, miten mallinnusmenetelmissä varioitavat parametrit vaikuttavat saatuihin mittaus-tuloksiin ja onko eri menetelmissä mahdollista valita parametrit niin, että ne antavat yhteneväisiä mallinnustuloksia.

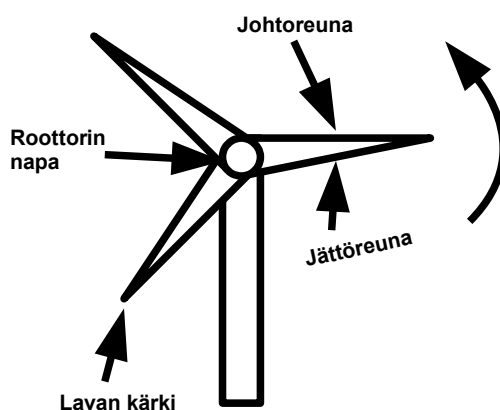
2 Tuulivoimalamelun synty

Tässä osiossa kuvataan, miten melu syntyy tuulivoimalan eri osissa sekä käydään läpi, millaisia ominaisuuksia melulähteeseen ja syntyvään meluun liittyy.

Tuulivoimalat koostuvat tornista, horisontaalisesta akselista sekä roottorista, joka on nykyään yleensä sijoitettuna ylätuulen puolelle. Tuulen liike-energia muutetaan roottorilapojen avulla pyörimisenergiaksi ja siitä edelleen generaattorissa sähköenergiaksi. Roottorin pyörimisliike sovitetaan generaattorille sopivaksi voimalan vaihteiston avulla. Tuulivoimalan tuottama melu voidaan jakaa sen syntymekanismien perusteella kahteen luokkaan, jotka ovat aerodynaaminen ja mekaaninen melu eli laitemelu. Turbiinin roottorilavat ovat voimalan merkittävin melulähde ja ne tuottavat laajakaistaista aerodynaamista melua.

2.1 Mekaaninen ja aerodynaaminen melu

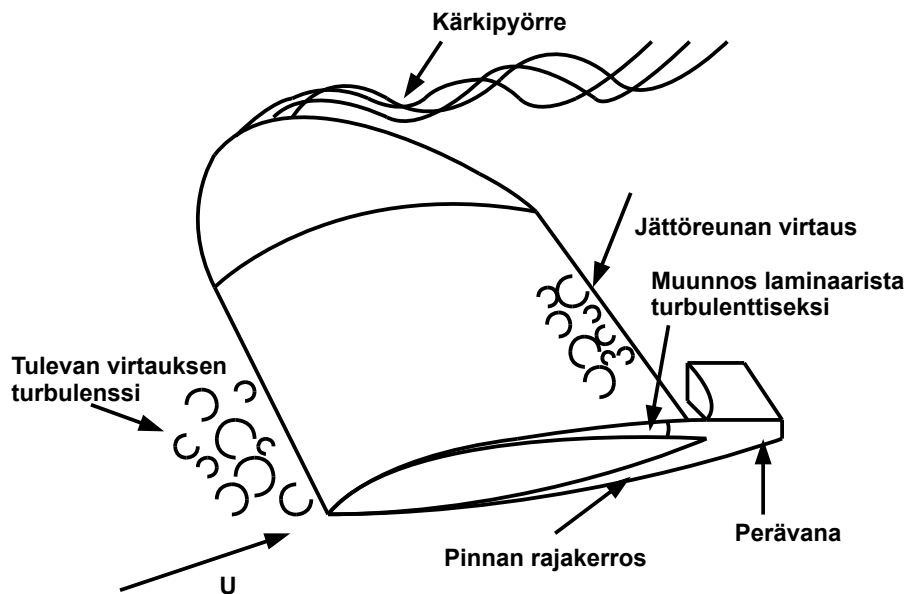
Mekaanista melua syntyy voimalatornin mekaanisista osista, joita ovat muun muassa vaihteet, generaattori ja puhaltimet. Melua aiheuttaa mekaanisten ja elektronisten osien pyörimisliike, joten melu on usein tonaalista, mutta saattaa olla myös laajakaistaista. Tonaalisia ääneksiä voi esiintyä esimerkiksi vaihteiden ja generaattorin pyörimistajuuksilla sekä hammaspyörien ryntötaajuuksilla. [6]



Kuva 1: Tuulivoimala alavirrasta katsottuna. [14]

Aerodynaaminen melu syntyy ilman virratessa voimalan lapojen ympäri. Aerodynaaminen ääni lisääntyy yleensä roottorin pyörimisnopeuden kasvaessa [6]. Aerodynaamista melua voi syntyä tuulivoimalassa monella eri syntymekanismilla, joita käsitellään tässä osiossa. Tarkastellaan aluksi ilmavirtausta lavan ympäri. Kuvassa 1 on esitetty tuulivoimala alavirrasta katsottuna. Kuvassa voimala pyörii alavirrasta katsottuna vastapäivään, kuten suurin osa nykyaikaisista tuulivoimaloista. Pyörivän lavan etureunaa kutsutaan johtoreunaksi ja takareunaa jättöreunaksi.

Voimalan yksittäinen pyörivä siipi näkee kuvan 2 mukaisesti vasemmalta oikealle kulkevan ilmavirtauksen U . Tämä ilmavirtaus koostuu tuulennopeudesta U_w ja siiven pyörimisnopeudesta U_r kuvan 3 mukaisesti. Siiven kärjen kohdalla pyörimisnopeus on luokkaa 70 – 80 m/s, kun tuulennopeus on noin 10 m/s. Lapojen siipi-

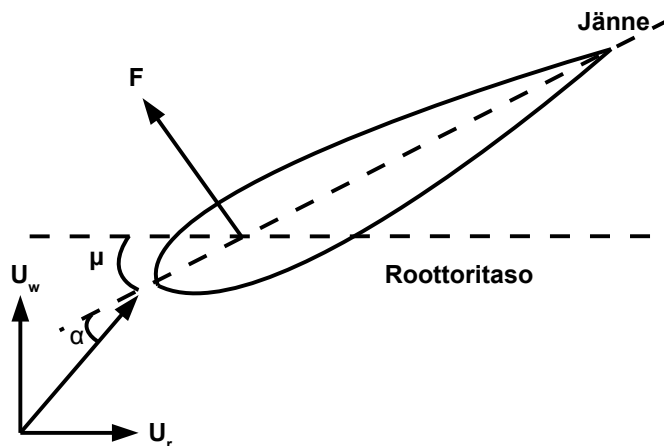


Kuva 2: Ilmavirtaus roottorilavan ohitse. [15]

profiili on suunniteltu niin, että se ohjaa tulevan ilmvirran kohtaamaan lavan sen alapuolelta roottoritasoa vasten ja tuottamaan voiman F . Tämän voiman roottoritasoon suuntainen komponentti saa roottorilavat pyörimään. Voima on samankaltainen kuin noste, jonka lentokoneen siivet tuottavat. [14]

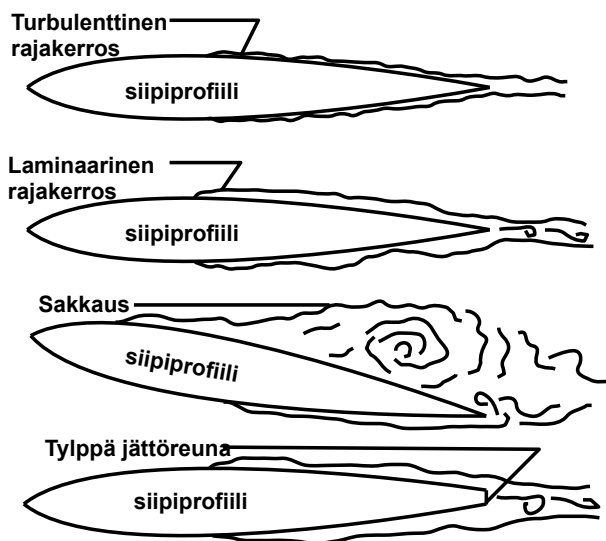
Lavan ylätuulen puoleista alaosaa kutsutaan painepuoleksi ja alatuulen puoleista yläosaa imupuoleksi. Kuvassa 3 näkyvää virtausnopeuden U ja siiven jänteen välistä kulmaa kutsutaan kohtauskulmaksi α . Kulma jänteen ja roottoritason välillä on μ , joka koostuu kiinteästä siiven kiertymästä ja säädettävästä siiven lapakulmasta (englanniksi pitch). Kuvasta nähdään, että kohtauskulmaa voidaan suurentaa pienentämällä lapakulmaa. Myös tuulennopeuden lisääntyminen kasvattaa kohtauskulmaa. Suurempi kohtauskulma tuottaa enemmän nostetta eli suuremman voiman F . Tällöin vääntömomentti ja lavan pyörimisnopeus kasvavat. Kun ilmavirta kulkee lavan ohitse, kehittyy viskositeetin vaikutuksesta ilmakerros, joka osittain "tarttuu" lavan pintaan. Tätä kerrosta kutsutaan pinnan rajakerrokseksi (englanniksi surface boundary layer). Kohtauskulman kasvattaminen tuottaa paksun rajakerroksen lavan alapinnalle, kun taas lavan yläpinnalla rajakerros ohenee. Rajakerroksessa lavan pinnalla ilmvirran suhteellinen nopeus lapaan nähden on nolla. Muutaman sentin paksuisen rajakerroksen reunalla ilmvirran nopeus on U . Roottorilavan rajakerros on laminaarinen, mutta lavan kärkeä kohti mentäessä se muuttuu laminaarista turbulenttiseksi. Laminaarisessa rajakerroksessa virtaavat ilmakerrokset liukuvat toistensa ohi sekoittumatta keskenään. Turbulenttinen rajakerros on kaoottisempi ja sisältää turbulenttisia pyörteitä. Suurin osa lapojen tuottamasta äänestä syntyy lavan uloimmassa osassa ja syynä siihen on juuri turbulenttinen rajakerros. [14]

Kuvassa 2 on esitetty tuulivoimalan lavan tuottaman aerodynaamisen melun syntymekanismit. Melun lähteitä ovat lavan johtoreuna, kärki ja jättöreuna. Roottorilavan johtoreunaan kohdistuvan tulevan ilmvirran turbulenttisuus tuottaa tur-



Kuva 3: Siipiprofilin ja ilmavirtauksen muodostamat kulmat. [14]

bulenttista melua (englanniksi inflow turbulence noise). Turbulenttisuuden aiheuttajana voi olla ilmakehän rajakerroksen turbulenttisuus tai tuulipuiston tapauksessa myös muiden turbiinien perävanojen pyörteet. Näin ollen tämä melulähde riippuu merkittävästi kulloisistakin ajasta riippuvista ilmakehän olosuhteista. Vielä on epäselvää, miten suuri vaikutus tällä syntymekanismeilla on tuulivoimalan tuottamaan kokonaismelutasoon. Lavan kärjen tuottama melu liittyy lavan kärjessä syntyvään kärkipyörteeseen. Melua aiheutuu lavan yläpuolen eli imupuolen ja alapuolen eli painepuolen välisestä paine-erosta, joka synnyttää kärkipyörteen. Tämä kärkimelu (englanniksi tip noise) aiheutuu, kun siiven molemmilla puolilla kulkevat ilmavirrat kohtaavat siiven kärjessä ja aiheuttavat turbulenttisen kärkipyörteen. [14]



Kuva 4: Siipiprofilin tuottaman melun (englanniksi airfoil self-noise) syntymekanismit. [14]

Lavan jättöreunalla melulähteenä toimii siipiprofilin yli kulkevan virtauksen turbulenttisuuden ja lavan jättöreunan välinen vuorovaikutus (englanniksi airfoil self noise). Olosuhteista riippuen tämä melu voi syntyä neljällä eri tavalla, jotka on esitetty kuvassa 4. Ylimmässä kuvassa on esitetty miten edellä mainittu lavan uloimman osan rajakerroksen turbulenttisuus synnyttää melua lavan jättöreunalla. Tämä on nykyaikaisten tuuliturbiinien merkittävin melulähde (englanniksi trailing edge noise). Vaikka pinnan rajakerros pysyisi muuten laminaarisena koko siiven matkalla, voi jättöreunalta siipiprofilin yli ylävirtaan säteilevä melu laukaista rajakerroksen muutoksen laminaarisesta turbulenttiseksi. Tämän jättöreunalla syntyvän melun syntymekanismi on esitetty kuvan 4 toiseksi ylimmässä kuvassa. Lapakulma suurenee tuulennopeuden kasvaessa. Jos ilmavirtauksen tulokulma kasvaa liian suureksi, niin ilmavirtaus irtoaa lapaprofilin imupuolelta ja aiheuttaa niin kutsutun sakkauksen, joka on esitetty toiseksi alimmassa kuvassa. Ilmiö ei kuitenkaan normaaleissa tuuliolosuhteissa ole ongelma nykyaikaisissa lapakulmasäätöisissä voimaloissa, joissa sakkkaus voidaan yleensä ennaltaehkäistä. Jos siipiprofilin jättöreuna on suunniteltu liian paksuksi, voi se aiheuttaa tonaalista melua tuottavan pyörteisen virtauksen alimman kuvan mukaisesti. Yleensä tämä syntymekanismi voidaan välttää suunnittelemalla siipiprofilin niin, että jättöreuna on riittävän ohut. [14]

2.2 Pyörivä äänilähde

Melulähteenä toimivan tuuliturbiinin lavat ovat jatkuessa pyörimisliikkeessä paikallaan olevaan havaitsijaan nähden. Tämä liike vaikuttaa sekä havaitun äänen taajuuteen että amplitudiin. Oletetaan äänilähteen liikkuvan nopeudella v ja säteilevän ääntä taajuudella f . Paikallaan pysyvän havaitsijan kokeman äänen taajuus saadaan kaavasta [14]

$$f' = \frac{f}{1 - \frac{v}{c} \cos t}, \quad (1)$$

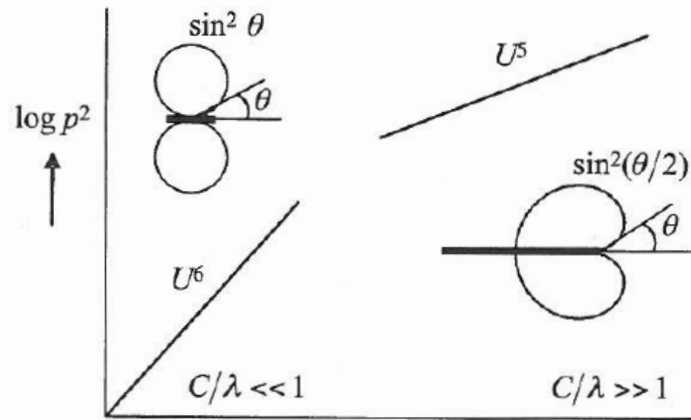
missä c on äänennopeus ja t kulma lähteen nopeusvektorin ja lähde-vastaanottaja linjan välillä emissiohetkellä. Tämä tunnettu fysikaalinen tapahtuma on nimeltään Doppler-ilmiö. Kun äänilähde kulkee kohti tarkastelijaa, havaittu äänen taajuus kasvaa ja kun se kulkee poispäin, taajuus pienenee. Äänilähteen liikkeen tuottamaa äänenvoimakkuuden eli amplitudin kasvua kutsutaan englanninkielisillä termeillä Doppler amplification ja convective amplification. Ilmiön voimakkuus riippuu äänilähteen ominaisuuksista. Pienen Mach-luvun omaavilla aerodynaamisista melua tuottavilla lähteillä amplitudi muuttuu tekijällä [14]

$$\frac{1}{(1 - M \cos t)^2}, \quad (2)$$

missä M tarkoittaa Mach-lukua. Se on lähteen nopeuden ja äänennopeuden osamäärä v/c . Äänitaso kasvaa kun lähde kulkee kohti havaitsijaa ja pienenee lähteen kulkiessa poispäin. [14]

2.3 Äänilähteen suuntaavuus

Tuulivoimalan merkittävin melulähde on roottorilavan uloin osa. Ääntä tuottaa siipiprofilin ja turbulenssin välinen vuorovaikutus. Merkittävin melu syntyy turbulenttisuuden vaikutuksesta lavan jättöreunalla. Turbulenttisten pyörteiden koko suhteessa siipiprofilin mittoihin vaikuttaa siihen, millainen suuntaavuus tällä äänilähteellä on. Jos pyörteet ovat pidempiä kuin siiven jänne, muodostuu siipiprofilin yli matalia taajuuksia tuottava dipolilähde. Lähteen ääniteho on verrannollinen äänenpaineen neliöön p^2 . Lähteen ääniteho on verrannollinen virtausnopeuden U kuudenteen potenssiin eli $p^2 \sim U^6$. Lähteen suuntaavuuden verrannollisuus puolestaan on $p^2 \sim \sin^2 \theta$, missä θ on säteilysuunnan ja tulevan ilmapirran välinen kulma. Jos turbulenttiset pyörteet ovat pienempiä kuin siipiprofilin jänne, turbulenttisten pyörteiden tuottama melu säteilee johtoreunalta (englanniksi inflow turbulence noise) ja jättöreunalta (trailing edge noise). Tällöin ääniteho on verrannollinen tulevan virtauksen viidenteen potenssiin $p^2 \sim U^5$ ja lähteiden suuntaavuus saadaan verrannollisuudesta $p^2 \sim \sin^2(\theta/2)$. Näin ollen jättöreunan tuottama ääni säteilee lähinnä ylävirtaan ja johtoreunan tuottama melu alavirtaan. [14]

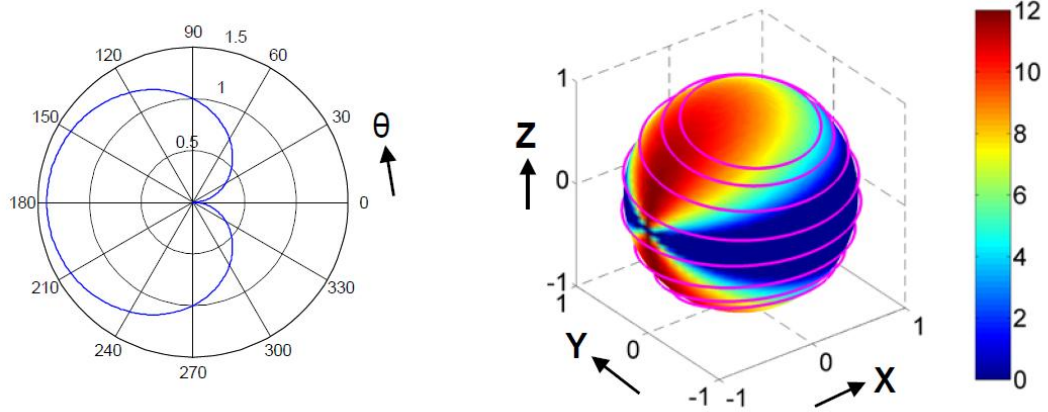


Kuva 5: Siipiprofilin tuottaman melun (englanniksi airfoil self-noise) pystysuuntaisen suuntaavuuden ja ilmapirtauksen nopeuden välinen yhteys. [14]

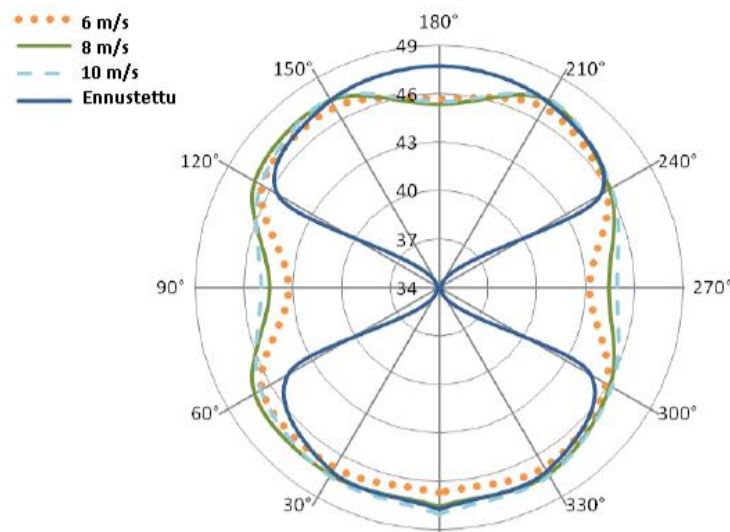
Kuvassa 5 on esitetty miten ilmapirtauksen nopeus vaikuttaa siipiprofilin tuottaman melun pystysuoraan suuntaavuuteen. Kuvassa x -akselilla on virtausnopeus U . Kuvassa C on jänneen pituus ja λ on turbulenssin pyörrekoko. Muutos dipolilähteestä reunalähteeksi tapahtuu jo niin pienillä nopeuksilla, että siipiprofili toimii dipolilähteenä vain kuuloalueen alapuolella [14].

Kuvassa 6 on esitetty siiven jättöreunan melun suuntaavuus. Vasemmanpuoleisessa kuvassa jättöreuna sijaitsee origossa ja johtoreuna sen vasemmalla puolella. Oikeanpuoleisessa kuvassa jättöreuna on y -akselin suuntainen ja ilmapirta kulkee x -akselin suuntaisesti. Oikeanpuoleisesta kuvasta nähdään, että jättöreunan melun suuntakuvion ja ilmapirtauksen yhteisvaikutuksesta ääni etenee voimakkaimmin ylävirtaan noin 45 asteen kulmassa xy -tasoon nähden.

Kuvassa 7 on esitetty tuulivoimalan taajuuskaistalla 250 Hz – 800 Hz mitat-



Kuva 6: Mallinnuksella saatu jättöreunan suuntaavuuden kuvaaja. [16]



Kuva 7: Tuulivoimalan mitattu ja mallinnuksella ennustettu horisontaalinen suuntaavuus. [17]

tu horisontaalinen suuntaavuus eri tuulennopeuksilla sekä laskentamallilla ennustettu suuntaavuus. Kuvasta nähdään, etteivät mittauksilla saadut suuntakuviot ole niin dipolilähteen suuntakuvion muotoisia kuin laskentamallin antama suuntakuvio. Eräissä tuulivoimamelun mittauksissa on havaittu matalilla taajuuksilla jättöreunan tuottamalle äänelle dipolilähteen horisontaalinen suuntakuvio, kun suuntakuvio korkeilla taajuuksilla puolestaan oli kardioidi [18].

2.4 Pistelähdeoletus

Kirjallisuudessa on usein esitetty mallinnuksessa käytettäväksi napakorkeudelle sijoitettua ympärisäteilevää pistelähdettä [19] [20] [21]. Edellä esitetyn perusteella voidaan sanoa, ettei ympärisäteilyn ehdo todellisuudessa aivan täyty, mutta tuu-

livoimala on lähes ympärisäteilevä. Vielä kun otetaan huomioon, että tuulivoimalan asento muuttuu tuulensuunnan muutosten mukana, säteilykuvio pitkäaikaisissa mittauksissa lähestyy horisontaalisessa tasossa entisestään pistelähteen suuntakuviota. Lisäksi joissakin sääolosuhteissa (esimerkiksi ilmakehän inversiotilanteessa) saattaa muodostua ilmakehään ääntä sopivasti kohti maan pintaa heijastava [22] tai taivuttava [23] ilmakerros, jonka vaikutuksesta äänilähteen vaimeneminen muistuttaa enemmän viivalähteen vaimenemista kuin pistelähteen vaimenemista. Tästä syystä melulähteeksi on ehdotettu myös pystysuoraa viivalähdettä [23]. Tuulivoimalan äänilähdettä ei ole aivan pistemäinen, sillä suurin osa voimalan tuottamasta melusta syntyy lapojen uloimmassa osassa. Mallinnuksissa lähteenä onkin käytetty myös ympyrän muotoon asetettuja pistelähteitä [24] ja lähteeksi on ehdotettu esimerkiksi roottorin pyyhkäisyypinnan kokoista aluelähdettä [25]. Näiden lähteiden ongelmana on se, että todellisuudessa tuulivoimala ei pysy samassa asennossa, vaan pyörii akselillaan tuulensuunnan mukana. Näin ollen todellisuutta kuvaamaan tarvittaisiin suurempi joukko eri asennoissa olevia äänilähteitä. Tässä diplomityössä on testattu miten pystysuoran viivalähteen käyttö vaikuttaa äänen etenemiseen suhteessa pistelähteeseen. Pystysuora viivalähde on yksinkertaistus kuten pistelähdekin, mutta monien asiantuntijoiden mielestä se on parempi yksinkertaistus kuin pistelähde.

Kaukokentässä sekä pistelähteen, että viivalähteen tuottama keskiäänitaso pienenee kuusi desibeliä etäisyyden kaksinkertaistuessa. Lähikentässä pistelähteellä pieneminen on myös kuusi desibeliä, mutta viivalähteelle vain kolme desibeliä. Tarkastellaan nyt ehtoja sille, miten määritellään ollaanko äänilähteen lähi- vai kaukokentässä. Antennitekniikassa antennille, jotka ovat fyysisesti suurempia kuin niiden säteilyn puoli aallonpituutta, on määritetty termi Fraunhofer-etäisyys d_f , jonka kaava [26] on

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (3)$$

missä D on lähteen suurin dimensio ja λ on aallonpituus. Tämä etäisyys luo rajan lähi- ja kaukokentälle. Lisäksi kaukokentän tulee toteuttaa seuraavat kaksi ehtoa [26]:

$$d_f \gg D, \quad (4)$$

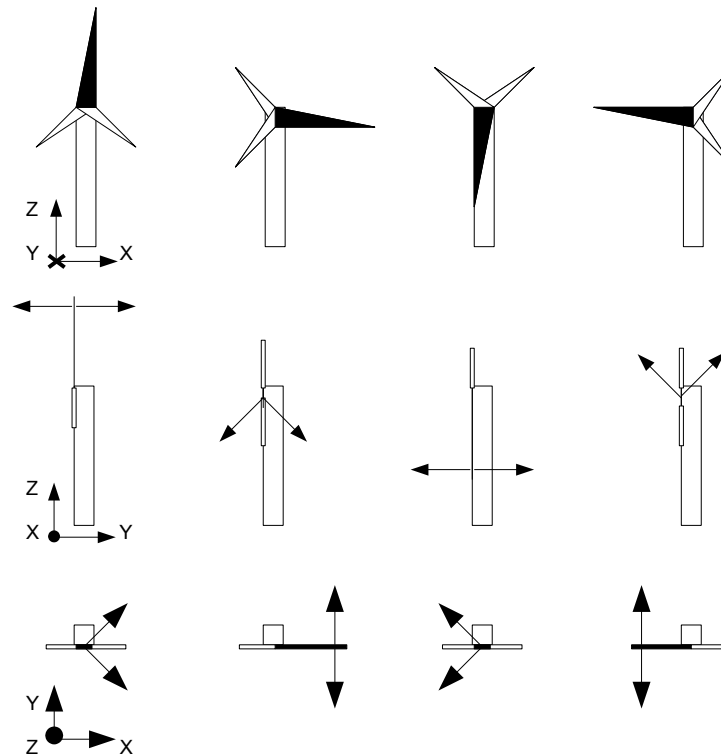
$$d_f \gg \lambda. \quad (5)$$

2.5 Amplitudimodulaatio

Tuulivoimalan tuottama melu on laajakaistaista. Tuulivoimalan aikaansaama melu ei kuitenkaan ole tasaista vaan ajan mukana vaihtelevaa johtuen siipien pyörimisliikkeestä. Mittauksin on havaittu, että suoraan sivulta mitatun melun voimakkuuden vaihtelu on suurempaa kuin suoraan alatuulesta mitatulla melulla. Tuulivoimalamelun amplitudimodulaatio on melutason vaihtelua, joka esiintyy jaksollisena pyörimistaajuuudella, jolla roottorin lavat ohittava voimalan tornin. Englanninkielisessä kirjallisuudessa lähellä voimalaa havaittua modulaatiota kuvataan usein sanalla ”swish”, suomeksi suhahdus, joka kuvastaa ilmiön tuottaman äänen ominaisuuksia.

Se on laajakaistaista aerodynaamista melua, jonka aiheuttavat voimalan lapojen jättöreunan melun suuntaavuus ja Doppler-vahvistus. [14]

Tyypillisesti suurilla tuulivoimaloilla swish-amplitudimodulaation voimakkuus on korkeimmillaan noin 5 dB ja se esiintyy taajuuksilla 400 – 1000 Hz. Äänilähteen kardioidin muotoisen suuntakuvion johdosta ilmiö vaimenee voimakkaasti etenkin ala- ja ylätuuleen etäisyyden kasvaessa. Ilmiö onkin yleensä voimakkaimmillaan sivutuuleen suunnassa, mikä johtuu jättöreunan melun suuntaavuudesta ja Doppler-vahvistuksesta. Doppler-vahvistuksen vaikutus on helposti ymmärrettävissä, sillä sivutuuleessa sijaitsevaan havaitsijaan nähden voimalan lapa kulkee pyörimisliikkeen aikana suoraan kohti havaitsijaa, jolloin lavan tuottama ääni vahvistuu ja liikkeen vastakkaisessa vaiheessa suoraan havaitsijasta poispäin. Kuvan 6 vasemmanpuoleisesta kuvasta nähdään, että jättöreunan tuottaa kardioidin muotoisen suuntakuvion. Kun lapa on yläasennossa, suuntakuvio on vaakatasossa ja jättöreunan melu suuntautuu voimakkaimmin vaakatasossa kohti sivutuulta. Lavan ollessa vaakatasossa suuntakuvio on pystytasossa eikä jättöreunan melua suuntakuvion perusteella kantaudu ollenkaan sivutuuleen. Kun voimala pyörii, suuntautuu jättöreunan melu sivutuuleessa seisovaan havaitsijaan voimakkaimmin lavan pyöriessä kohti havaitsijaa. Sivutuuleessa tuulivoimalan tuottama äänenpainetaso on keskimäärin alhaisempi kuin suoraan ylä- ja alatuuleen. Tämä johtuu kuvassa 7 esitetystä tuulivoimamelun horisontaalisesta suuntakuvioista. [16] [27]



Kuva 8: Tuulivoimalan tuottaman ”swish”-amplitudimodulaation suuntaavuus.

Yleisesti on tiedossa, että tuulivoimaloiden tuottama aerodynaaminen melu syntyy lähellä roottorin siipien kärkiä. Alatuulesta voimalan akselilta katsottuna, olet-

taen että turbiini pyörii myötäpäivään, kun siipi ohittaa horisontaalisen tason liikkuessaan alaspäin, kuullaan tarkastelupisteessä swish-modulaatio. Lavan tuottaman äänen suuntaavuudesta johtuen ääni säteilee pääasiallisesti siiven pyörimissuuntaan nähden 45 asteen kulmassa ala- ja ylätuuleen kuvan 8 mukaisesti. Seistessä tuulivoimalan akselin kohdalla ylä- tai alatuuleen swish-ääni havaitaan siis suoraan voimalan akselilla, kun lapa on vaaka-asennossa liikkumassa alaspäin. Kun lapa on ala-asennossa, voimakkain swish syntyy 45 asteen kulmassa lavan pyörimissuuntaan nähden viistosti ylä- ja alatuuleen. [28]

Tämä edellä kuvattu amplitudimodulaatio on normaalia tuulivoimamelua ja sitä havaitaan lähes kaikissa olosuhteissa lähellä voimalaa [29]. Tietyissä olosuhteissa amplitudimodulaation taso ja ominaisuudet voivat kuitenkin muuttua siten, että matalien taajuuksien osuus äänessä kasvaa, modulaatiosyvyys kasvaa ja samoin kasvaa etäisyys, jolla ilmiä havaitaan. Amplitudimodulaation korkeita tasoja on havaittu tietyissä tapauksissa suurilla etäisyyksillä tuulivoimaloista ylä- ja alatuuleen. Näitä tapauksia ei ole voitu selittää edellä kuvatuilla äänensyntymekanismeilla. [30] [31]

Tätä matalataajuisista kauempana havaittavaa amplitudimodulaatiota kuvataan englanninkielisellä termillä ”thump”, suomeksi tömähdys. Varmaa tietoa sen syntymekanismeista ei ole, mutta asiasta on esitetty useita teorioita. Melun aiheuttajaksi on ehdotettu muun muassa siipien tuottaman melun suuntaavuutta, siipien ja tornin vuorovaikutusta, tuulennopeuden vaihtelua pyyhkäisypinnalla ja useamman turbiinin välistä vuorovaikutusta. Kaksi avainmekanismia, jotka saattavat vaikuttaa ilmiöön, ovat voimakas ilmavirran turbulenssin ja irronnut tai sakannut virtaus yli roottorilapojen. Nämä ilmiöt selittävät matalien taajuuksien lisääntymisen havaituksessa äänessä, mutta ne eivät selitä voimakasta amplitudimodulaatiota, jota on havaittu joissain tilanteissa suurilla etäisyyksillä voimalasta alatuuleen. Tärkeä lisäehto, joka voi aiheuttaa amplitudimodulaation ominaisuuksien voimakkaan muutoksen, on se, että tuuliturbiiniin saapuva ilmavirta on jollakin tapaa epäyhtenäinen. Tämä voi johtua joko tuuliprofiilin epäyhtenäisyydestä tai turbulenssin epätasaisesta jakautuneisuudesta pyyhkäisypinnalla. Tuuliprofiilin epäyhtenäisyyden voivat aiheuttaa monet tekijät. Eräs merkittävä syy ilmiön esiintymiseen saattaa olla stabiilissa ilmakehässä esiintyvä voimakas tuuliprofiili, jolloin tuulennopeus on lavan pyyhkäisypinnan yläosassa huomattavasti voimakkaampi kuin alaosassa [23]. Epäyhtenäisyyden voi tuottaa myös vertikaalinen vaihtelu tuulennopeudessa eli vertikaalinen tuuliväanne tai sivusuuntainen vaihtelu tuulennopeudessa, jonka voivat aiheuttaa tuulenpuuskat tai suuret turbulenssit. Epäyhtenäisyyttä voi aiheuttaa myös yksinkertaisesti vaakasuuntainen tai pystysuuntainen ero roottorin lapaan kohdistuvassa tuulensuunnassa. Tällöin kohtauskulman eli lapaprofiilin ja tulevan ilmavirtauksen välisen kulman ajallinen vaihtelu aiheuttaa amplitudimodulaation. Kun kohtauskulma on liian suuri, lapa sakkaa ja amplitudimodulaatio on voimakasta ylä- ja alatuuleen. Turbulenssin epäyhtenäisyys voi johtua siitä, että jokin este aiheuttaa turbulenssia pyyhkäisypinnalla, mutta vaikutus ei kata koko pintaa. Tämän voivat aiheuttaa esimerkiksi läheiset rakennukset tai puut, joiden vaikutuksesta turbulenssi kasvaa pyyhkäisypinnan alaosassa, mutta ei yläosassa. Tästä aiheutuu ajan mukana vaihtelevaa melua, jota syntyy aina kun voimalan lavat osuvat voimakkaan turbu-

lenssin alueelle. [9]

Eräs selitys kauempana havaittavaan matalataajuiseen amplitudimoduloituneeseen ääneen saattaa löytyä kuvassa 8 esitetystä oikeanpuoleisimmasta kuvasarjasta. Sen mukaan vaaka-asennossa oleva ylöspäin liikkuva lapa tuottaa swish-modulaatiota, joka suuntautuu 45 asteen kulmassa yläviistoon. Sopivissa tuuliolosuhteissa tämä moduloitunut ääni saattaa kaareutua takaisin kohti maanpintaa. Ilmakehän absorptio aiheuttaa sen, että korkeat taajuudet vaimenevat ilmakehässä enemmän kuin matalat taajuudet. Tästä syystä matalien taajuuksien osuus amplitudimoduloituneessa äänessä kasvaa.

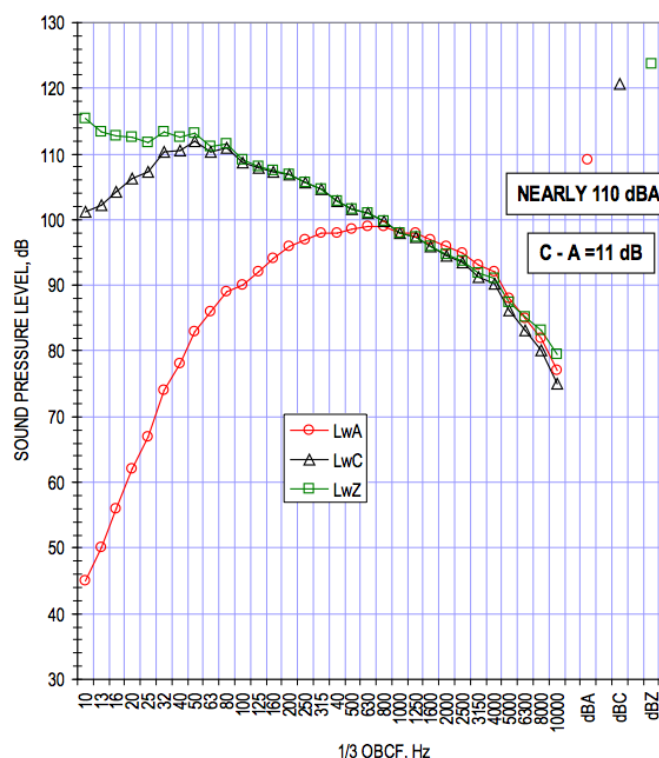
2.6 Pientaajuinen melu

Pienillä taajuuksilla tarkoitetaan yleensä taajuuksia 20 Hz ja 200 Hz välillä. Tätä alempia taajuuksia kutsutaan infraääniksi. Toisin kuin usein luullaan, ihmisen kuulo ei lakkaa toimintaansa tähän 20 hertsin rajaan, vaan jopa 1-2 Hz taajuudet voivat olla kuultavissa, kunhan niiden voimakkuus on vain riittävän suuri. Alle 20 hertsin taajuuksilla ääni havaitaan yhä korvien avulla, mutta tonaalisuus eli korkeusaistimus katoaa. [22]

Eräs tapa määrittää dominoivatko pienet taajuudet melua, on laskea erotus C-painotetusta ja A-painotetusta keskiäänitasosta. Usein pienten taajuuksien katsotaan olevan dominoivia, jos tämä erotus on luokkaa 15-20 desibeliä. Kirjan lopusta löytyvässä liitteessä A on selvitetty tarkemmin, mitä taajuuspainotus tarkoittaa. [20]

Taajuuspainottamattomat mittaustulokset osoittavat, että tuulivoimamelu sisältää suuria määriä infraääniä. Kuvassa 9 on esitetty arvio nykyaikaisen tuulivoimalan tuottamasta äänitehotasosta. Arvio perustuu mittauksiin 78 voimalasta, joiden teho on ollut väliltä 75 kW - 3,6 MW. Vihreillä neliöillä merkitty kuvaaja on taajuuspainottamaton äänitehotaso. Kuvasta nähdään, että tuulivoimalan tuottaa merkittävästi ääntä myös infraäänien taajuuksilla. [20] Mittaukset kuitenkin ovat osoittaneet, että tuulivoimaloiden läheisyydessä niiden tuottamien infraäänien taso jää alle kuulokynnyksen [32] [33]. On kuitenkin tutkitusti todettu, että ihmisen sisäkorva on herkkä pienille taajuuksille ja infraäänille, jotka jäävät alle kuulokynnyksen. Näin ollen ei voida olettaa etteikö tällainen ääni voisi vaikuttaa korvaan tai kuulijaan muilla tavoin. On mahdollista, että pientaajuiset äänet ja infraäänit vaikuttavat siihen, miten aivot käsittelevät korkeampien taajuuksien ääniä. Ne saattavat vaimentaa korkeampien taajuuksien aistimista ja tuottaa amplitudimodulaatiota korkeampien taajuuksien havainnointiin. Korkeiden taajuuksien läsnäolo vähentää korvan reagoitua infraääniin. Kun taas taustamelu on vähäistä ja infraäänit voimakkaita, korvaan infraäänistä kohdistuva vaikutus on suurimmillaan. Tällä saattaa olla merkitystä, kun tutkitaan tuulivoimaloiden tuottaman äänen vaikutusta hiljaisessa kuuntelu ympäristössä kuten esimerkiksi makuuhuoneessa. [34]

Tuulivoimaloiden koon kasvaessa on myös lisääntynyt huoli siitä, siirtyykö voimaloiden tuottama melu kohti pienempiä taajuuksia. Erään tutkimuksen mukaan 2,3 - 3,6 MW voimaloiden tuottaman melun pienten taajuuksien suhteellinen osuus on suurempi kuin alle 2 MW voimaloiden melussa. Tutkimuksen mukaan melun spektri



Kuva 9: Tuulivoimalan tuottaman melun eri taajuuspainotuksilla painotettuja mitaustuloksia.

siirtyy voimaloiden koon näin kasvaessa noin kolmasosa oktaavin verran kohti pieniä taajuuksia taajuuskaistalla 63 - 250 Hz [22]. Pientaajuisen melun osuutta tuulivoimamelussa lisää myös ilmakehän absorption vaikutus. Äänen edetessä ilmakehässä absorptio vaimentaa enemmän suuria kuin pieniä taajuuksia. Näin ollen pienten taajuuksien osuus äänessä kasvaa, vaikkei niiden taso varsinaisesti kasvakaan. Dominoiva pientaajuisen melun äänilähde on pyyhkäisypinnalle tulevan turbulenssin ja pyörivän siiven välinen vuorovaikutus [35].

Ajoittain tuulivoimaloiden on todettu myös tuottavan ääntä, jota kuvataan englanninkielisellä termillä *rumble*, suomeksi *jyminä* tai *jytinä*. Kuitenkin tämän äänen paikallistaminen tietyn turbiinin tuottamaksi ja tulosuunnan määrittäminen korvakuulolta on hankalaa [30]. Rumblella tarkoitetaan melua, joka sisältää pysyviä pientaajuisia komponentteja. Kun äänen spektrin taso laskee riittävästi taajuuden kasvaessa, on kyseessä *rumble*-ilmiö. Kuuntelukokein on todettu, että kuuntelijat kokivat häiritsevämmäksi simuloidun ilmastointimelun, joka sisälsi suurempia pientaajuisia komponentteja eli enemmän *rumblea*. Jyminän häiritsevyyteen vaikuttavat myös melun äänitaso ja amplitudimodulaation voimakkuus. [36]

3 Tuulivoimalamelun eteneminen

Tuulivoimalan melun havaittavuuteen tarkastelupisteessä vaikuttavat äänilähde, äänen etenemisreitti ja äänen vastaanottajan ominaisuudet.

Tuulivoimaloiden tuottaman äänen leviämiseen vaikuttaa äänitehotason lisäksi myös etenemisympäristö ja sen olosuhteet. Leviämiseen vaikuttavat ilmakehässä vallitsevat olosuhteet, jotka voivat tuottaa ilmakehän epähomogeenisuutta kuten tuulennopeus ja -suunta, turbulenssi, sekä ilmakehän lämpötilaprofili. Lisäksi ilmakehän paine, lämpötila ja sen suhteellinen kosteus määräävät miten ilmakehä absorboi etenevää ääntä. Myös maaperän koostumus ja muoto, sekä erilaiset esteet etenemistiellä kuten metsä, vaikuttavat etenevään äänen. On syytä huomioida, että maaperän vaikutus voi vaihdella huomattavasti vuodenaikojen mukaan.

3.1 Geometrinen vaimentuminen

Geometrinen tai etenemisvaimennus aiheutuu siitä, että lähteen säteilemän äänienergian oletetaan jakautuvan tasaisesti homogeeniseen ilmakehään. Pistelähteen tapauksessa äänienergia säteilee ympäristöön pallopintana. Tällöin äänenpaine on kääntäen verrannollinen etäisyyteen. Tämä tarkoittaa sitä, että etäisyyden kaksinkertaistuksessa äänenpainetaso pienenee kuusi desibeliä. Tämä vaimentuminen ei ole taajuusriippuvainen, vaan kaikki taajuudet vaimenevat samalla tavalla. Viivalähteen energia puolestaan säteilee ympäristöön sylinteripinnan muotoisena. Sen tuottama äänenpaine on verrannollinen etäisyyden neliöjuureen eli etäisyyden kaksinkertaistuksessa äänenpainetaso pienenee vain kolme desibeliä. Liittessä A on selvitetty tarkemmin, miten äänenpainetaso lasketaan. [37]

3.2 Ilmakehän absorptio

Ilmakehä vaimentaa eteneviä ääniaaltoja kahdella mekanismilla: viskositeetin ja lämmönjohtavuuden aiheuttamina häviöinä sekä ilmakehän molekyyliden relaksaatioprosessin kautta. Viskositeetin ja lämmönjohtumisen aiheuttamia häviöitä kutsutaan klassiseksi vaimenemiseksi. Klassinen vaimeneminen liittyy kaasumolekyyliden kineettisen energian muuttumiseen lämmöksi ja relaksaatiohäviöt liittyvät moniatomisten kaasumolekyyliden liike-energian muuttumisesta molekyyliden sisäiseksi energiaksi [38]. Viskositeetin aiheuttamat häviöt johtuvat ilmamolekyyliden välisestä kitkasta, josta seuraa lämpenemistä. Tästä syystä osa äänienergiasta johtuu lämpönä ilmaan. Lämmönjohtavuuden aiheuttamat häviöt syntyvät kun lämpöenergia siirtyy etenevän ääniaallon aiheuttamien väliaineen kokoonpuristuneiden tihentymien ja laajenemisen aiheuttamien harventumien välillä [39]. Molekyyliden relaksaatiolla tarkoitetaan prosessia, jossa äänienergia hetkellisesti absorboituu ilmamolekyyleihin. Tämä aikaansaa molekyyliden värähtelyä. Tämä molekyyliden värähtely interferoi jäljempänä saapuvien ääniaaltojen kanssa, mistä seuraa tulevien ääniaaltojen vaimenemista. [40]

Kansainvälinen standardi ISO 9613-1:1993 määrittelee analyttisen menetelmän, jolla voidaan laskea ilmakehän aiheuttama absorptio erilaisissa ilmakehän olosuhteis-

sa. Laskennalla saadun ilmakehän absorption suuruuteen vaikuttavat äänen taajuus sekä ilmakehän paine, lämpötila ja suhteellinen kosteus. Standardi kattaa menetelmät laskea vaimennus ääneksille, laajakaistaiselle äänelle tai näiden kahden yhdistelmälle. [41]

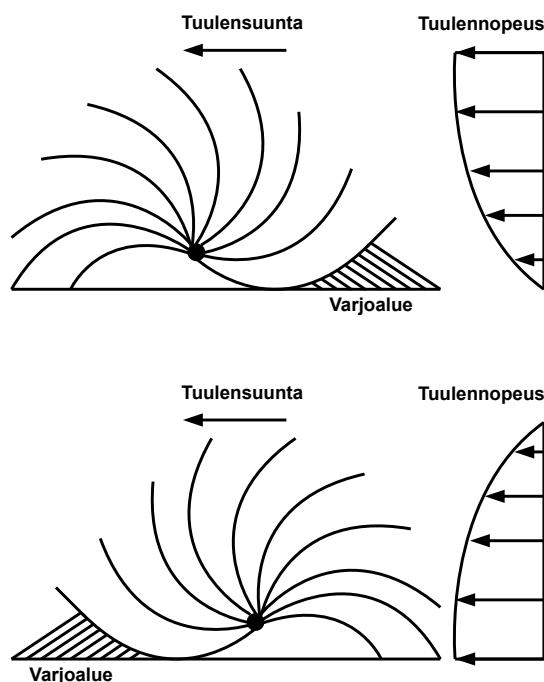
3.3 Maanpinnan vaimennus

Maaperää, jonka ylitse ääni etenee, ei yleensä voida ajatella täysin kovaksi ja ääntä heijastavaksi. Poikkeuksina tähän ovat muun muassa kallio, betoni, jää ja tyyni vedenpinta. Tyypillisesti maaperä, joka voi olla myös kasvillisuuden peittämä, absorboi ainakin jonkin verran ääntä. Lisäksi maaperä luo etenevälle äänisäteelle heijastuspinnan, joka mahdollistaa sekundäärisen etenemisreitit syntymisen lähteestä tarkastelupisteeseen. Heijastunut ääni kulkee ilmakehässä pidemmän matkan kuin suora ääni ja näin ollen ilmakehän absorptio ja geometrinen vaimeneminen vaikuttavat siihen enemmän kuin suoraan ääneen. Lisäksi maanpinnasta tapahtuva heijastus vaikuttaa heijastuvan äänen tasoon ja vaiheeseen. Matkaerosta johtuen ääniaallot voivat saapua vastaanottopisteeseen eri vaiheissa. [40]

Tarkastelupisteessä suoran ja heijastuneen äänen välillä voi tapahtua interferenssi, joka riippuu ääniaaltojen vaiheista ja amplitudeista. Interferenssi voi olla joko konstruktivinen eli vahvistava tai destruktiivinen eli vaimentava. Jos suora ja heijastunut ääni saapuvat vastaanottopisteeseen samassa vaiheessa, eikä heijastunut ääni ole vaimentunut maaheijastuksen vaikutuksesta, äänenpainetaso voisi tällä oletuksella lisääntyä kuusi desibeliä heijastuksen vaikutuksesta. Kuten edellä todettiin, ilmakehän absorptio ja geometrinen vaimeneminen vaikuttavat heijastuneeseen ääneen enemmän kuin suoraan ääneen, joten vahvistuminen ei voi todellisuudessa tilanteessa saavuttaa aivan kuutta desibeliä. Jos puolestaan säteet saapuvat vastaanottopisteeseen yhtä voimakkaina, mutta vastakkaisessa vaiheessa, aiheuttaa destruktiivinen interferenssi teoriassa äänen vaimentumisen kokonaan, jos heijastuneen äänen suoraa ääntä suurempi vaimeneminen jätetään huomioimatta. Todellisissa tilanteissa vaimennus tai vahvistus on aina jotain näiden kahden ääripään väliltä. [37]

3.4 Tuulen vaikutus

Geometristä vaimennusta käsitelleessä osiossa edellä oletettiin, että ilmakehä on akustisesti homogeeninen. Todellisuudessa näin ei useinkaan ole. Esimerkiksi tuulennopeus usein laskee mentäessä kohti maanpintaa. Tämä johtuu maanpinnan ja ilmavirtauksen välisestä kitkasta, joka pienentää tuulennopeutta sitä enemmän, mitä lähempänä maanpintaa ollaan. Ilmakehän rajakerrokseksi kutsutaan toposfäärin alaosaa, jossa alapuolella oleva maa- tai vesipinta vaikuttaa ilmakehään voimakkaimmin. Rajakerroksen korkeuden vaihtelee ilman termisen tasapainotilan ja säätilan mukaan. Suomessa rajakerroksen korkeus on useimmiten 100 - 1000 metriä. Rajakerroksen alinta osaa kutsutaan pintakerrokseksi ja sen korkeus on noin 10 prosenttia rajakerroksesta. Pintakitkan vaikutuksesta tuulennopeus heikkenee pintakerroksessa lähes logaritmisesti tuulen suunnan pysyessä lähes samana. [42]

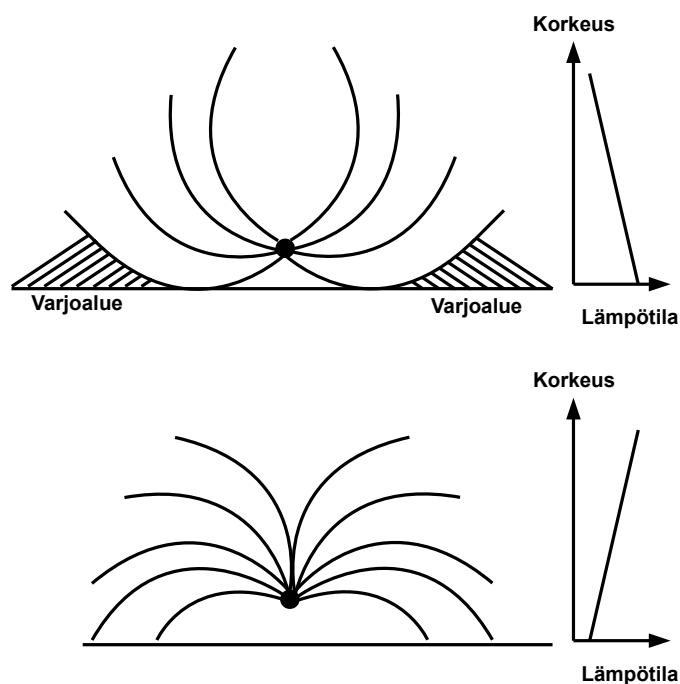


Kuva 10: Ääniaaltojen kaareutuminen tuulen vaikutuksesta. [40]

Jos tuulennopeus kasvaa kuvan 10 ylemmän kuvan mukaisesti mentäessä ilmakehässä korkeammalle, kasvaa äänennopeus ylöspäin mentäessä ja tuulensuuntaan etenevä ääniaalto taittuu alaspäin. Tällaisella tuuliprofililla vastatuuleen kulkevan ääniaallon äänennopeus pienenee korkeuden kasvaessa, joten ääniaallot taittuvat ylöspäin. Tällöin ylätuulen puolelle muodostuu varjoalue, jonne suora ääni ei pääse etenemään ollenkaan. Ääniaallot taittuvat siis aina kohti alhaisempaa äänennopeutta. [37] [40]

3.5 Ilmakehän lämpötila

Pystysuuntaisella lämpötilan muutoksella on samanlainen vaikutus kuin tuulennopeuden muutoksellakin. Äänennopeus kasvaa lämpötilan kasvaessa ja on suoraan verrannollinen keltineissä ilmoitetun lämpötilan neliöjuureen. Ääniaallot taittuvat kohti alhaisempaa äänennopeutta, joka on tässä tapauksessa siis alhaisempi lämpötila. Normaalitilanteessa ilmakehässä vallitsee negatiivinen lämpötilagradientti eli lämpötila pienenee korkeuden kasvaessa. Tällainen tilanne esiintyy tyypillisesti aurinkoisina iltapäivinä, kun aurinko lämmittää maanpintaa, josta lämpöä säteilee ilmaan. Tällaisella säällä ääniaallot taittuvat ylöspäin ja muodostavat ympyränmuotoisen varjoalueen lähteen ympärille kuvan 11 ylemmän kuvan mukaisesti. Päinvastainen tilanne ilmenee yöaikaan, kun maaperä absorptoi lämpöä ilmasta ja ilma lähellä maanpintaa viilenee nopeasti. Tällaista positiivisen lämpötilagradientin tilannetta kutsutaan inversioksi. Silloin ääniaallot taittuvat kohti maanpintaa alemman kuvan mukaisesti ja äänet voivat kantautu pitkienkin matkojen päähän vaimentuen vain vähän. [40]



Kuva 11: Ääniaaltojen kaareutuminen ilmakehän lämpötilaprofilin vaikutuksesta. [40]

3.6 Turbulenssi

Turbulenssi on kolmiulotteista ilmavirtauksen epäsäännöllistä vaihtelua ajan suhteen. Se voidaan jakaa syntymekansimin perusteella termiseen ja mekaaniseen turbulenssiin. Termisen turbulenssin aikaansaa nostevoima ja mekaanisen pystysuuntainen tuuliväanne. Termistä turbulenssia aiheuttaa ilman tiheyden pystysuuntainen vaihtelu. Ilmiötä esiintyy etenkin silloin, kun maan- tai merenpinta on ilmaa lämpimämpi. Tällöin pinnan tuntumassa lämmennyt ilma pyrkii kohoamaan ylöspäin. Myös ilman jäähtyminen saa aikaan termistä turbulenssia, kun jäähtynyt ilma pyrkii laskeutumaan alaspäin. Tuulennopeuksilla, jotka ovat yli 10 m/s, termisen turbulenssin merkitys on kuitenkin hyvin vähäinen. Mekaaniseen turbulenssiin vaikuttaa tuulennopeuden muuttuminen korkeuden funktiona, maaston rosoisuus, suuret esteet sekä ilmakehän stabiilisuus. Turbulenssi syntyy ilman virratessa rosoisen maanpinnan tai esteiden kuten talojen tai tuntureiden yli. Tällöin ilmavirta taipuu esteen ohitse ja tuulen suunta kääntyy muodostaen pyörteitä ja epäsäännöllisiä virtauksia esteen taakse. [42] [43]

Kun ääniaalto saapuu turbulenttisuuteen, se kohtaa paikallisia äänennopeuden vaihteluita. Kuten edellä on jo todettu, äänennopeuden muuttuminen aiheuttaa ääniaallon taittumista. Turbulenttisuuden vaikutus on kuitenkin satunnaisempi kuin tuulennopeuden tai lämpötilan aiheuttama systemaattinen taittuminen. Turbulenttisuuden aiheuttamaa taittumista kuvataan termillä aaltosironta, sillä osa ääniaallon energiasta siroaa ympäristöön ja näin ääniaalto vaimenee. [37]

3.7 Maanpinnan muoto

Maaperän koostumuksen lisäksi maaperän pinnanmuodot vaikuttavat olennaisesti äänen etenemiseen. Aiemmissa äänen etenemistä käsittelevissä osioissa maanpinta on oletettu tasaiseksi. Tämän lisäksi maanpinta voi olla myös joko kumpuileva eli vaihteleva, kovera tai kaareva (kupera). Maanpinta voi muodostaa kaarevan kummun äänilähteen ja vastaanottopisteen välille. Tällöin kumpu estää näköyhteyden vastaanottopisteen ja lähteen välille. Kumpua voidaan pitää meluesteenä, joka aiheuttaa äänen varjoalueen, jossa vastaanottopiste sijaitsee. Tällöin varjoalueelle saapuva ääni on esteestä diffraktoitunutta eli taipunutta ääntä. Varjoalueen aiheuttamaan äänitason vaimenemiseen vaikuttaa lähteen ja vastaanottopisteen etäisyys esteestä, äänen taajuus ja se miten korkealle yli näköyhteyden este ulottuu. Varjoalue voi aiheuttaa jopa 10 - 20 desibelin vaimentuman vastaanottopisteen äänitasossa. Kummun vastakohta on kovera laakso, jonka maasto voi muodostaa äänilähteen ja havainnointipisteen välille. Kovera maanpinta lisää heijastuvan äänen etenemisreittejä verrattuna tasaisen maan tapaukseen. Kovera alusta tuottaa tyypillisesti noin 2 desibeliä korkeampia äänitasoja verrattuna tasaisen maanpinnan aiheuttamaan äänitasoon. [37]

3.8 Mallinnusmenetelmä ISO 9613-2

Standardeihin ISO 9613-1:1993 [41] ja ISO 9613-2:1996 [44] perustuvaa ulkome-lun vaimentumista käsittelevää laskentalogiikkaa hyödynnetään useissa kaupallisissa tuulivoimamelun mallinnukseen soveltuvissa mallinnusohjelmissä. Tällaisia ohjelmia ovat muun muassa SoundPLAN, WindPro ja CadnaA. Menetelmä on suunniteltu eri ympäristömelulähteistä tapahtuvan äänen leviämisen laskennalliseen ennustamiseen. Se antaa laskentatulokset A-painotettuina jatkuvina keskiäänitasoina ja oktaavikaistoittain tunnetuille lähteille äänenetenemiselle suotuisissa ilmakehän olosuhteissa. Standardi ISO 9613-1:1993 käsittelee ilmakehän aiheuttamaa äänenabsorptiota, joka vaimentaa eteneviä ääniaaltoja. Toinen standardi ISO 9613-2:1996 puolestaan pitää sisällään kaikki fysikaaliset etenevän ääniaallon vaimenemismekanismit kuten geometrisen etenemisvaimennuksen, ilmakehän absorption, maavaimennuksen, ilmasto-olosuhteiden vaikutuksen ja esteiden aiheuttaman vaimennuksen. Liitteessä A on selvitetty tarkemmin, mitä keskiäänitaso tarkoittaa.

ISO 9613-2 on suunniteltu käytettäväksi matalalla sijaitsevilla melulähteillä tehtäville melulaskennoille kuten tie- ja raideliikenteelle sekä teollisuuslähteille. Se ei sovellu käytettäväksi lentokone- tai impulssimaisen räjäytysmelun mallinnukseen. Menetelmä laskee melutiedot oktaavikaistoittain taajuusalueella 63 kHz - 8 kHz. Vastaanottopisteen oktaavikaistakohtainen A-painotettu keskiäänitaso L_{fT} saadaan yhtälöstä [44]

$$L_{fT} = L_W + D_C - A, \quad (6)$$

missä L_W on pistelähteen oktaavikaistan äänitehotaso desibeleinä, D_c on suuntaavuuskorjaus desibeleinä ja A on oktaavikaistan vaimentuminen desibeleinä lähteen

ja vastaanottajan välillä. Pistelähteelle suuntaavuuskorjaus on nolla desibeliä. Vaimennus A saadaan yhtälöstä [44]

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc}, \quad (7)$$

johon on eritelty etäisyysvaimennuksen, ilmakehän absorption, maavaimennuksen, esteiden sekä muiden tekijöiden aiheuttamat vaimennukset. Etäisyysvaimennus A_{div} saadaan kaavasta [44]

$$A_{div} = [20 \lg(d/d_0) + 11], \quad (8)$$

missä d on lähteen ja vastaanottajan välinen etäisyys metreinä ja d_0 on referenssie-
täisyys 1 metri.

Ilmakehän absorption aiheuttaman vaimennuksen laskeminen on mutkikas prosessi, joka on esitetty standardissa ISO9613-1. Standardista löytyy valmiit taulukot absorptiokertoimelle α laskettuna desibeleinä per kilometri taajuuden, suhteellisen kosteuden, lämpötilan ja staattisen ilmanpaineen funktiona. Sijoittamalla taulukon antama arvo kaavaan [44]

$$A_{atm} = \alpha d / 1000, \quad (9)$$

saadaan selville ilmakehän aiheuttama vaimennus desibeleinä lähteen ja havaitsijan välillä.

Tasaisen maanpinnan tai tasaisen rinteen aiheuttama maavaimennus lasketaan oktaavikaistoittain kaavasta [44]

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m. \quad (10)$$

Yhtälössä A_s on lähteen lähellä tapahtuva vaimennus. Lähdealue, jolla vaimennus tapahtuu, ulottuu lähteestä $30h_s$ etäisyydelle kohti vastaanottajaa, mutta maksimissaan etäisyydelle d_p , missä h_s on lähteen korkeus ja d_p lähteen ja vastaanottajan välinen etäisyys. A_r on lähellä vastaanottajaa tapahtuva vaimennus. Vastaanottaja-alue ulottuu vastaanottajasta etäisyydelle $30h_r$ kohti lähdettä, missä h_r on vastaanottajan korkeus. Jälleen maksimietäisyys on kuitenkin d_p . Edellisten ehtojen rajaamien alueiden väliin jää niin sanottu keskialue, jossa vaimennus on A_m . Jos $d_p < (30h_s + 30h_r)$, niin vastaanottajan ja lähteen läheiset alueet menevät päällekkäin eikä keskialuetta ole ollenkaan.

Edellä kuvatulla tavalla määriteltujen alueiden akustiset ominaisuudet huomioidaan laskennassa maavaimennuskertoimen G avulla. Heijastavat pinnat jaetaan kolmeen luokkaan seuraavalla tavalla niiden akustisten ominaisuuksien mukaan. Katukiveys, vesistöt, jää, betoni ja muut kovat pinnat luokitellaan kovaksi maaksi, jolle $G = 0$. Huokoisia maanpintoja ovat esimerkiksi nurmikon, puiden tai muun kasvillisuuden peittämät alueet, joille $G = 1$. Maanpinnat, jotka koostuvat sekä kovasta että huokoisesta materiaalista, saavat G :n arvoja väliltä nolasta ykköseen sen mukaan, kuinka suuri osuus maanpinnasta on huokoista. Standardissa on annettu kaavat, miten vaimennukset lasketaan eri oktaavikaistoille, kun tiedetään jokaisen alueen maavaimennus G . Jos ollaan kiinnostuneita oktaavikaistojen sijaan vain A-painotetusta

kokonaistasosta, niin koko taajuusalueen maavaimennus desibeleinä voidaan laskea kaavasta [44]

$$A_{gr} = 4,8 - (2h_m/d)[17 + (300/d)] \geq 0 \text{ dB}, \quad (11)$$

missä h_m on äänen etenemisreitän keskikorkeus metreinä maanpinnasta ja d on vastaanottajan ja lähteen välinen etäisyys metreinä.

ISO 9613-2 olettaa lähteestä havaitsijaan päin vaikuttavan 1-5 m/s myötätuulen sekä inversio-olosuhteet. Näistä syistä se on käyttökelpoinen niin sanotun pahimman tilanteen (englanniksi worst case) mallintamiseen eli kun halutaan tietää, ylittyvätkö melun ohjearvot missään tilanteessa edes hetkellisesti. [37]

Joskus voi olla tarpeen mallintaa keskiäänitاسoa pidemmällä esimerkiksi useamman kuukauden mittaisella aikavälillä, jolloin sääolosuhteet voivat olla vaihtelevia. Säävaihtelut voidaan huomioida standardissa meteorologisen korjauksen C_{met} avulla, joka saadaan yhtälöistä [44]

$$C_{met} = \begin{cases} 0, & d_p \leq 10(h_s + h_f) \\ C_0[1 - 10(h_s + h_r)/d_p], & d_p > 10(h_s + h_f), \end{cases} \quad (12)$$

missä h_s on lähteen korkeus metreinä, h_r on vastaanottajan korkeus metreinä, d_p on lähteen ja vastaanottajan välinen etäisyys metreinä projisoituna maanpinnalle ja C_0 on desibeleissä ilmoitettu tekijä, joka riippuu tuulen nopeuden ja suunnan sekä lämpötilagradientin paikallisista meteorologisista tilastoista. Standardin mukaan käytännössä korjaustermi rajoittuu välille nolasta viiteen desibeliin ja yli kahden desibelin korjaukset ovat poikkeuksellisia. [44]

3.9 Mallinnusmenetelmä Nord2000

Nord2000 on pohjoismaisen yhteistyön hedelmänä syntynyt mallinnusmetodiikka, joka ei kuitenkaan ole lyönyt itseään läpi kovin laajasti ainakaan tuulivoimakäytössä Pohjoismaiden ulkopuolella. Se on huomattavasti ISO 9613-2:a monipuolisempi ja omaa kattavammat mahdollisuudet varioida mallinnukseen vaikuttavia meteorologisia tekijöitä. Nord2000 kykenee mallinnukseen terssikaistoittain taajuusalueella 25 - 10000 Hz. Siinä pistelähteen tuottama terssikaistakohtainen keskiäänitaso L_R vastaanottopisteessä lasketaan kaavalla [45]

$$L_R = L_W + \Delta L_d + \Delta L_a + \Delta L_t + \Delta L_s + \Delta L_r, \quad (13)$$

missä L_W on lähteen tuottama äänitehotaso terssikaistalla, ΔL_d on etäisyysvaimennuksen vaikutus, ΔL_a on ilmakehän absorption vaikutus ja ΔL_t on maaston vaikutus, joka sisältää sekä maan että esteiden (englanniksi barriers) vaikutuksen. ΔL_s kaavassa on sironnan vaikutus ja viimeinen termi ΔL_r on heijastusten vaikutus, johon vaikuttaa heijastavan esteen (englanniksi obstacle) mittasuhteet sekä pinnan ominaisuudet.

Taajuusriippumaton ΔL_d saadaan yhtälöstä [45]

$$\Delta L_d = -10 \log(4\pi R^2), \quad (14)$$

missä R on etäisyys lähteen ja vastaanottajan välillä. Etäisyysvaimennus määräytyy samalla tavalla kuin ISO 9613-2 -menetelmässä kaavalla 8. Yhtälöt on vain kirjoitettu hieman eri muotoon.

Ilmakehän absorption vaikutus ΔL_a lasketaan mallinnusmenetelmässä standardin ISO9613-1 mukaisesti terssikaistoille 50 Hz ja 10000 Hz välille. Alle 50 Hertsin terssikaistoilla ilmakehän vaikutus jätetään menetelmässä huomioimatta. ISO-standardissa vaimennus on laskettu puhtaille ääneksille, joten se ei ole aivan tarkka laajakaistaiselle äänelle tehtävässä vaimennuslaskennassa. Mallinnusmenetelmä mahdollistaa tämän seikan huomioonottamisen, jolloin ilmakehän absorption aiheuttama vaimennus terssikaistalla saadaan ääneksiin perustuvasta vaimennuksesta A_0 kaavalla [45]

$$\Delta L_a = -A_0(1,0053255 - 0,00122622A_0)^{1,6}. \quad (15)$$

Maavaimennus huomioidaan menetelmässä hieman eri tavalla kuin ISO 9613-2 laskentamallissa. Maanpinnan ominaisuuksia kuvaa maanpinnan ominaisvirtausvastus, jonka avulla määritetään maanpinnan impedanssi Delaney'n ja Bazley'n kaavalla [46]

$$Z = 1 + 9,08\left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0,75} + i11,9\left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0,73}, \quad (16)$$

missä f on terssikaistan keskitaajuus ja σ on tehollinen ominaisvirtausvastus (englanniksi effective flow resistivity). Taulukkoon 2 on listattu Nordtestin ominaisvirtausvastusluokkiin perustuva maaperätyyppien erottelu impedanssiluokkiin.

Maaperän vaimennuksen mallinnus menetelmässä jakaantuu koherenttiin ja epäkoherenttiin malliin. Koherentti malli sisältää eri menetelmät tasaisen maan, laakson ja kukkulan maavaimennuksen laskemiseen. Impedanssiluokan lisäksi maavaimennukseen vaikuttaa karheusparametri σ_r , joka on maaston epätasaisuuden määritelmä. Jos maaperän karheustermi ei ole nolla, otetaan se huomioon epäkoherenttissa laskennassa. Koherenttissa laskennassa tasaiselle maalle maavaimennus ΔL_{flat} määritellään äänenpaineena p vastaanottopisteessä verrattuna vapaankentän äänenpaineeseen p_0 kaavalla [45]

$$\Delta L_{flat} = 20 \log \left| \frac{p}{p_0} \right| = 20 \log \left| 1 + \frac{R_1}{R_2} Q e^{jk(R_2 - R_1)} \right|, \quad (17)$$

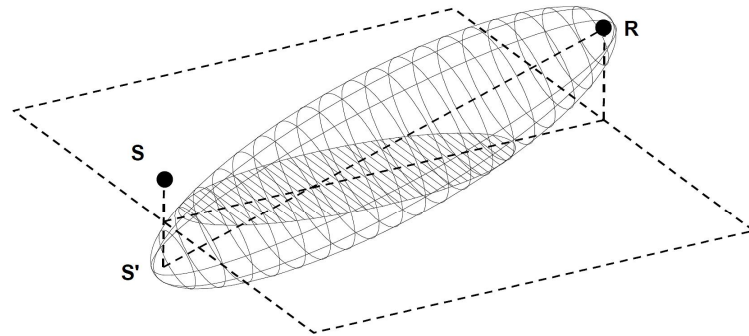
missä R_1 on suoran äänen kulkema matka ja R_2 on heijastuneen äänen kulkema matka. Kaavassa Q on maaperän impedanssin, heijastuskulman ja heijastuksen kulkeman matkan funktio.

Vastaanottajalle saapuvaan maanpinnasta heijastuvaan ääneen vaikuttaa menetelmässä niin sanottu Fresnel-alue. Fresnel-ellipsoidi muodostuu kuvan 12 mukaisesti. Kuvassa R on vastaanottaja, S on lähde ja S' sen kuvalähde. Fresnel-alue on Fresnel-ellipsoidin ja maanpinnan leikkauspinta. Maanpinnan ominaisuudet Fresnel-alueessa määrittelevät äänikentän vastaanottopisteessä. [45]

Tässä mallinnusmenetelmässä sääolosuhteet huomioidaan äänennopeuden kautta. Effektiivinen äänennopeus $c(z)$ on ilmakehän olosuhteista johtuvan äänennopeuden ja tuulennopeuden kombinaatio, jota voidaan approksimoida kaavalla [47]

Taulukko 2: Impedanssiin perustuva maaperäluokittelu. [45]

| Impedanssi-luokka | Edustava virtausvastus σ [kNsm ⁻⁴] | Nordtestin ominaisvirtausvastusluokkien arvoalue | Maaston kuvaus |
|-------------------|---|--|---|
| A | 12,5 | 10, 16 | Erittäin pehmeä (lumi tai sammal) |
| B | 31,5 | 25, 40 | Pehmeä metsän aluskasvillisuus (lyhyt, tiivis kannervikko tai sammalkerros) |
| C | 80 | 63, 100 | Irtonainen maaperä (nurmikko, heinikko tai muu irtonainen maalaji) |
| D | 200 | 160, 250 | Normaali tiivistymätön maa (metsän aluskasvillisuus tai laidunmaa) |
| E | 500 | 400, 630 | Tiivis avomaa (tiivis nurmikko tai puistoalue) |
| F | 2000 | 2000 | Tiivis kiinteä maanpinta (soratietie tai parkkipaikka) |
| G | 20000 | 20000 | Kova pinta (tiheä asfaltti, betoni tai vesi) |



Kuva 12: Fresnel-alueen muodostaminen Fresnel-ellipsoidin avulla. [45]

$$c(z) = A \ln\left(\frac{z}{z_0} + 1\right) + Bz + C, \quad (18)$$

missä z on korkeus maanpinnan yläpuolella, z_0 on maanpinnan karheustermi, A on lineaarinen komponentti, B on logaritminen komponentti ja viimeinen termi C on

äänennopeus korkeudella $h = 0$ m. Jos tuulennopeuden u äänen etenemissuunnan mukainen komponentti korkeudella z_u tiedetään, niin nopeusprofilin logaritmisen osan termi A voidaan määritellä yhtälöllä [47]

$$A = \frac{u(z_u)}{\ln\left(\frac{z_u}{z_0} + 1\right)}. \quad (19)$$

Jos lämpötilan oletetaan kasvavan lineaarisesti korkeuden funktiona (lämpötilagradientti dt/dz on vakio), niin äänen nopeus voidaan olettaa korkeuden lineaariseksi funktioksi, jolloin lineaarinen komponentti B saadaan yhtälöstä [47]

$$B = \frac{dt}{dz} \frac{10,025}{\sqrt{t + 273,15}}, \quad (20)$$

Yhtälön 18 viimeinen termi C eli äänennopeus maanpinnalla saadaan yhtälöstä [47]

$$C = \frac{1}{h_R - h_S} \int_{h_S}^{h_R} c(z) dz - \frac{c(h_R) - c(h_S)}{h_R - h_S} \frac{h_S + h_R}{2}, \quad (21)$$

missä h_S on lähteen ja h_R vastaanottajan korkeus metreinä maanpinnasta.

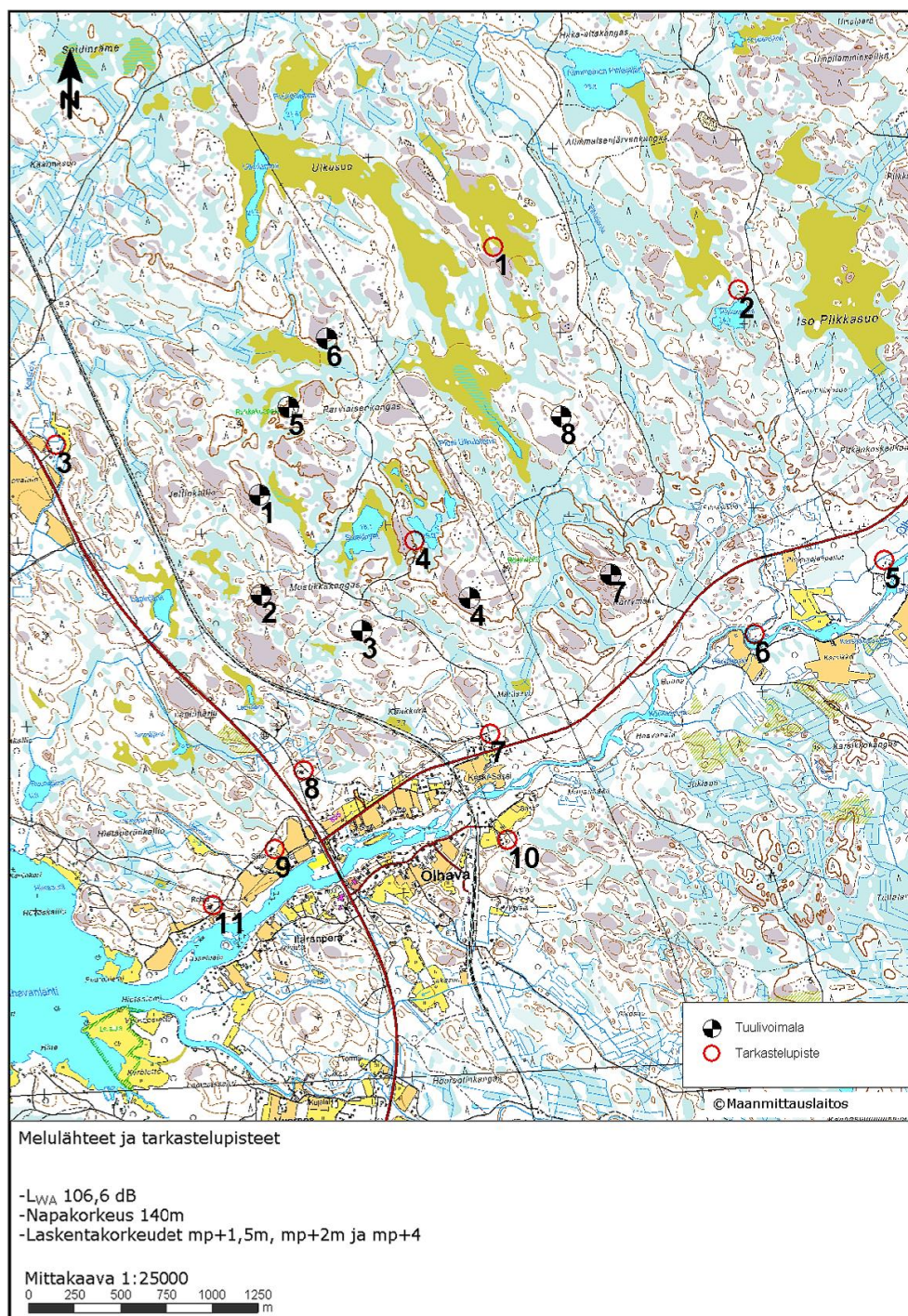
4 Tuulivoimamelumittaukset

Tässä osiossa käydään läpi tämän diplomityön yhteydessä tehtyjä tuulivoimapuiston melumittauksia ja niiden tuloksia. Ensin käydään läpi tarkemmin mitattava kohde, minkä jälkeen perehdytään emissiomittauksiin ja niiden tuloksiin. Lopuksi käydään läpi kohteessa tehtyjä sisä- ja ulkoimmissiomittauksia sekä niissä ilmennyttä amplitudimodulaatiota ja pientaajuista melua.

Mittausmenetelmien ohjeistuksena on käytetty tuulivoimameluohjeistusprojektin yhteydessä laaditun tutkimusraportin ”Tuulivoimamelun mittausmetodiikan kehittäminen” [13] luonnosversiota (14.2.2013 päivitetty versio). Sen ohjeistus perustuu altistuvan kohteen mittauksen (eli immissiomittauksen) osalta IEA:n suositukseen [48] melutason mittaamisesta tuulivoimamelulle altistuvassa kohteessa. Tuulivoimalan melupäästön mittaamiseen (eli emissiomittaukseen) on kansainvälisesti vakiintunut standardi IEC 61400-11 [49]. Sen lisäksi mittausohjeen laadinnassa on käytetty lähteenä myös hieman standardia yksinkertaisemman Tanskan tuulivoimamelusääädöksen mittausmenetelmien ohjeistusta [50].

Ohjeistuksessa kuvataan menetelmät sekä tuulivoimalan melupäästön että altistuvan kohteen melutason mittaamiseen. Ohjeistuksen mukaisilla mittauksilla pyritään selvittämään tuulivoimalan valmistajan tai tuulipuiston rakentajan ilmoittaman tuuliturbiinin melupäästöarvon oikeellisuus ja tarkistamaan tällä melupäästöarvolla tehtyt melumallinnukset. Ohjeen mukaisten mittauksen tarkoituksena ei siis ole selvittää altistuvan kohteen melutasoja suhteessa melulle annettuihin ohjearvoihin. Tästä syystä mittauksille ei ole ohjeessa annettu arviota mittauksen epävarmuudesta. Hyvin suoritettut todentamismittaukset antavat ohjeistuksen mukaan yksikäsitteiden verifiointituloksen, joten mittauksen epävarmuusarviota ei tarvita. Epävarmuudet on kansainvälisen käytännön mukaisesti sisällytetty jo tuulivoimalavalmistajan ilmoittamaan melupäästöarvoon, joten melupäästömittaustulosta verrataan sellaisenaan ilmoitettuun arvoon.

Melumittauksia suoritettiin Iin Olhavassa sijaitsevassa TuuliWatti Oy:n tuulivoimapuistossa. Puisto sijaitsee valtatie neljän ja pääradan itäpuolella. Läntisimmän voimalan ja valtatie välinen etäisyys on noin 900 metriä. Päärata kulkee lähimmillään noin 600 metrin päässä samaisesta voimalasta. Puisto koostuu kahdeksasta Vestas V112 -tyypin tuulivoimalasta, joiden nimellisteho on 3 MW. Kuvassa 13 on esitetty tuuliturbiinien sijoittuminen tuulipuistossa. Voimaloiden napakorkeus on 140 metriä ja roottorin halkaisija 112 metriä. Kohteeseen tehtiin kaksi mittauskäyntiä. Ensimmäinen mittauskäynti kohteeseen toteutettiin 17.-18.12.2012 ja se oli tutustuminen mittauskohteeseen ja sen ympäristöön. Toinen mittauskäynti 25.2-1.3.2013 oli pitkäkestoisempi ja laajempi. Pääasiallisena mittauspaikkana molemmilla käynneillä toimi tuulipuiston keskellä sijaitseva sähköistämätön kesämökki ja sen piha-alue. Tämän lisäksi tehtiin myös emissiomittauksia, joilla selvitettiin voimaloiden tuottaman melun äänitehotasoa eri tuulennopeuksilla. Mittaukset tehtiin siis talviaikaan. Vain IEA:n ohjeistus kieltää mittaukset, kun lumi on maassa [48]. Muut kansainväliset mittausohjeet eivät ota aiheeseen kantaa [49] [50]. Ohjeistusprojektin aikataulun puitteissa mittauksen siirtäminen keväälle tai kesälle ei kuitenkaan ollut mahdollista, joten mittausajankohdat valikoituivat sääennustuksia seuraamalla ja



Kuva 13: Tuulivoimaloiden ja melumallinnuksen tarkastelupisteiden sijainnit Olhavan tuulivoimapuistossa.

parhaita tuuliolosuhteita ennustuksista arvioimalla. Mittaukset haluttiin toteuttaa ainakin osittain kaakkoistuulella, sillä näin tuulensuunta olisi mökkiä lähimmältä tuulivoimalalta (OL4) kohti mittauspistettä. Suotuisia mittausolosuhteita ei syksyn ja talven mittaan esiintynyt kovin usein, sillä useimmiten seudulla tuulee lännen tai

lounaan suunnalta [51]. Myöskään tuulennopeus ei useimmiten ollut riittävän voimakas ohjeistuksen mukaisille mittauksille. Ongelmana oli myös tuulipuiston sijainti kaukana pohjoisessa. Mittausajankohtaa suunniteltaessa sääennustukset muuttuivat vielä viime hetkillä. Vasta noin vuorokautta ennen mittausajankohtaa pystytettiin riittävällä varmuudella toteamaan, tulisivatko sääolosuhteet olemaan mittauksille suotuisat. Näin ollen mittajaalta vaadittiin lähes jatkuvaa valmiutta lähteä mittauksiin nopealla varoitusaajalla.

4.1 Emissiomittaukset

Tässä osiossa käydään läpi tuulivoimameluohjeistusprojektin emissiomittausohjeistusta ja miten ohjeistus huomioitiin melupäästömittauksissa. Ensimmäisellä mittauskäynnillä tuulisuus kohteessa oli vähenemässä ja parhaista mittausolosuhteista myöhästettiin hieman. Tuulennopeus oli jo laskenut ohjeistuksen mukaisia arvoja alemmas. Tuulennopeus ei siis ollut riittävä kunnollisten äänitehotasomittausten tekemiseen, joten mittaustuloksia ei esitetä tässä työssä. Toisella mittauskerralla tuulennopeus oli huomattavasti voimakkaampi kuin ensimmäisellä mittauskäynnillä ja emissiomittaukset saatiin toteutettua laajemmassa mittakaavassa. Suurimpana ongelmana mittauksissa oli kuitenkin tuulipuiston järjestelmän riittämätön tuulennopeuden tallennusväli.

Emissiomittaus tehtiin toisella mittauskäynnillä voimalalle numero kolme (OL3). Mittaus toteutettiin miehittämättömänä mittauksena yön yli. Mittausetäisyytenä haluttiin käyttää mittausohjeen mukaista etäisyyttä R , joka saadaan kaavasta

$$R = H + \frac{D}{2}, \quad (22)$$

missä H on voimalan napakorkeus ja D on roottorin halkaisija. Haluttu mittausetäisyys oli näin ollen 196 metriä. Etäisyys mittauspisteen ja voimalan välillä laskettiin laseretäisyysmittarilla. Mittauspisteen koordinaatit tallennettiin GPS-paikantimella. Tarkistettu mittausetäisyys oli 200 metriä. Ohjeistuksen mukaan mittausetäisyys saa poiketa 20 prosenttia, mutta korkeintaan 30 metriä laskukaavan mukaisesta halutusta mittausetäisyydestä.

Emissiomittaus suoritettiin mittausohjeistuksen mukaisesti siten, että mikrofoni oli asetettu metrin halkaisijaltaan olevan pyöreän kovan heijastavan levyn päälle. Mikrofonissa käytettiin puolikasta tuulisuojaa sekä lisäksi sekundaarista tuulisuoja. Taulukkoon 3 on merkitty tämän sekundaarisen tuulisuojan tuottama vaimennus terssikaistoittain. Vaimennuksen vaikutus on poistettu mittaustuloksista. Äänidata tallennettiin tarkkuusluokan 1 äänitasomittarilla terssikaistoittain. Mittausdata tallennettiin mittarille 10 sekunnin keskiäänitasoina F-aikapainotuksella. Tämä työn lopusta löytyvässä liitteessä A on selvitetty aikapainotuksen ja keskiäänitason käsitteet tarkemmin.

Ohjeistuksen mukaan melupäästö voidaan määrittää mittauksilla yhdelle tai useammalle tuulennopeudelle. Yleinen tapa on määrittää melupäästö tuulennopeudelle 8 m/s referenssikorkeudella 10 metriä. Tällöin napakorkeudella mitatusta tuulennopeudesta $V_{z,ref}$ lasketaan tuulennopeus 10 metrin korkeudella V_z kaavalla [49]

Taulukko 3: Reinhardt- tuulisuojan tuottama vaimennus mittaustulokseen terssi-kaistoittain.

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Taajuus [Hz] | 12,5 | 16 | 20 | 25 | 31,5 | 40 | 50 | 63 | 80 |
| Vaimennus [dB] | 0 | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0 | 0,2 |
| Taajuus [Hz] | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 |
| Vaimennus [dB] | 0,2 | 0,1 | -0,1 | -0,3 | 0 | 0,3 | 0,6 | 1,2 | 1,7 |
| Taajuus [Hz] | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 | 4000 | 5000 |
| Vaimennus [dB] | 1,7 | 0,7 | 1,3 | 1,7 | 1,6 | 2,3 | 2,6 | 2,1 | 0,8 |

$$V_z = V_{z,ref} \cdot \left(\frac{\ln(\frac{z}{z_0})}{\ln(\frac{z_{ref}}{z_0})} \right), \quad (23)$$

missä z on korkeus, jolla tuulennopeus halutaan laskea eli tässä 10 metriä, z_{ref} on napakorkeus ja z_0 on maaperän karheusermin arvo mittauspisteen kohdalla. Karheusermi määräytyy mittauspisteen maanpinnan tyypin mukaan [48] [49]. Karheuserminä voidaan käyttää myös jotain tiettyä vakioarvoa kuten $z_0 = 0,05$ metriä [50]. Taulukkoon 4 on listattu erilaisten maanpintojen karheuksia. Mittausten aikaisten tuulitietojen käsittelyssä karheuserminä käytettiin lumelle tarkoitettua arvoa $z_0 = 0,0001$ metriä.

Taulukko 4: Karheuden arvoja erilaisille maanpinnoille. [49]

| Maanpinnan tyyppi | Karheus z_0 [m] |
|---|-------------------------------------|
| Vesi, lumi tai hiekka | 0,0001 |
| Avoin tasainen maa, leikattu nurmi tai paljas maa | 0,01 |
| Viljelysmaa, jolla hieman kasvillisuutta | 0,05 |
| Asuinalueet, pienet kaupungit, metsät | 0,3 |

Melupäästö voidaan määrittää myös useilla tuulennopeuksilla. Suomalaisen ohjeistusluonnoksen mukaan silloin tulee käyttää nopeuksia 6, 7, 8, 9 ja 10 m/s. Mittaustulokset tulee tallentaa A-painotettuna terssi-kaistoittain vähintään taajuuskais-
talla 20 Hz - 10 000 Hz. Useita tuulennopeuksia käytettäessä on suositeltavaa jakaa mittaustulokset nopeusalueisiin. Esimerkiksi nopeusalue 7 m/s sisältää tällöin mitatut melupäästötulokset tuulennopeusväliltä 6,5 m/s - 7,5 m/s. Kutakin tuulennopeusluokkaa kohden tulisi tallentaa vähintään 10 kappaletta 10 sekunnin pituista mittausta. Taustamelu mitataan pysäyttämällä voimala ja suorittamalla tämän jälkeen samanlaiset mittaukset. Näin eri nopeuksilla vallitseva taustamelutaso voidaan ottaa huomioon mittaustulosten käsittelyssä.

Mitatun tuulivoimapuiston SCADA-järjestelmän tuulivoimalan toimintatietojen ja näin ollen myös tuulennopeuden tallennusväli oli 10 minuuttia. Tämä ei ole riittävä ohjeistusluonnoksen mukaisesti tehtäviin mittauksiin, joissa tuulennopeuden tallennusvälin tulisi olla 10 sekuntia. Kansainvälisten ohjeiden mukaan tuulennopeuden tallennusvälin tulisi olla 10 tai 60 sekuntia [49][50]. Ohjeistusten linja ei ole yhtenäinen, vaan myös 1-10 minuutin tallennusvälin on katsottu olevan riittävä [48]. Mittaustuloksia on tarkasteltu taajuuskaistalla 12,5 Hz - 5000 Hz. Tähän on syynä se, että melupäästömittaukseen äänitasomittari oli asetettu tallentamaan vain yli 20 desibelin äänenpainetasoja ja näin ollen 5000 hertsiä oli korkein terssikaista, joka sisälsi mittaustuloksia.

Terssikaistoittain laskettu tuulivoimalan näennäinen äänitehotaso $L_{WA,ref}$ (englanniksi apparent sound power level) saadaan yhtälöstä [50]

$$L_{WA,ref} = L_{A,ref,k} + 10 \log 4\pi(R^2 + h^2) - 6 \text{ dB}, \quad (24)$$

missä $L_{A,ref,k}$ on taustamelukorjattu terssikaistakohtainen mitattu äänenpainetaso, R on mittausetäisyys, h on voimalan napakorkeus. Korjaustermi 6 dB aiheutuu siitä, että mittaukset tulee tehdä ääntä hyvin heijastavan levyn pinnalta. Mittaustuloksiin tehtävä lisäys, jolla terssikaistakohtainen näennäinen äänitehotaso saatiin laskettua oli emissiomittauksessa 52,7 dB.

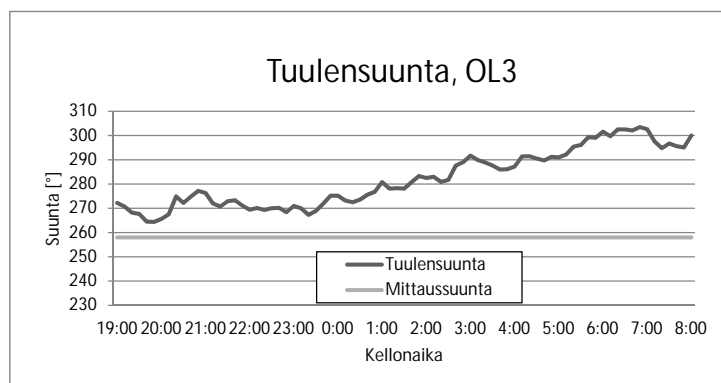
Taulukko 5: Etäisyysmittausvirheen vaikutus näennäiseen äänitehotasoon.

| Etäisyys [m] | 190 | 195 | 200 | 205 | 210 |
|--------------|------|------|-----|-----|-----|
| Muutos [dB] | -0,3 | -0,1 | 0 | 0,1 | 0,3 |

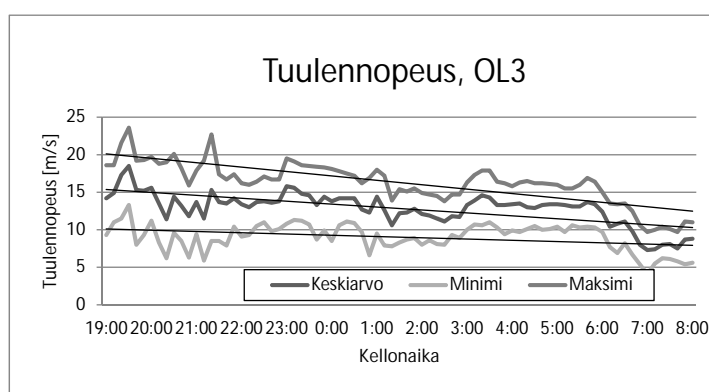
Taulukkoon 5 on laskettu, miten mahdollinen etäisyysmittausvirhe vaikutti saatuihin näennäisen äänitehotason arvoihin. Eri mittausetäisyyksiä on taulukossa verrattu mittauksessa käytettyyn etäisyyteen 200 metriä. Taulukon perusteella voidaan todeta, ettei mahdollinen etäisyysmittausvirhe ole merkittävästi vaikuttanut näennäisen äänitehotason mittaustulokseen.

Ohjeistuksen mukaan mittaustuloksen ja mittauspisteen välisen kulman sekä tuulensuunnan muodostaman kulman tulisi olla alle 15 astetta. Tuulivoimalan ja mittauspisteen välisen mittaussuunta oli noin 258 astetta eli länsilounaasta. Emissiomittauksen aikana tuulensuunta kääntyi kuvan 14 mukaisesti lännestä (270 astetta) noin 30 astetta kohti pohjoista. Näin ollen tuulensuunta suhteessa mittauspisteeseen oli mittaushetken mukainen vain osan mittaussuunnasta. Lisäksi tuuli hieppa työntyi yön kuluessa, kuten nähdään kuvasta 15. Emissiomittausolosuhteilta vaaditaan siis tiettyä stabiilisuutta. Ideaalisissa mittaussuhteissa tuulennopeuden olisi suotavaa vaihdella mahdollisimman suurella välillä, mutta tuulensuunnan tulisi pysytellä muuttumattomana.

Emissiomittauksen aikana tuulivoimalalle tehtiin kaksi 10 minuutin pysäytystä, joiden aikana mitattiin taustamelutasoa. Tämä ei ole missään nimessä riittävän pitkä aika taustamelutason määrittämiseen kaikilla tuulennopeusalueilla. Vielä kun tal-



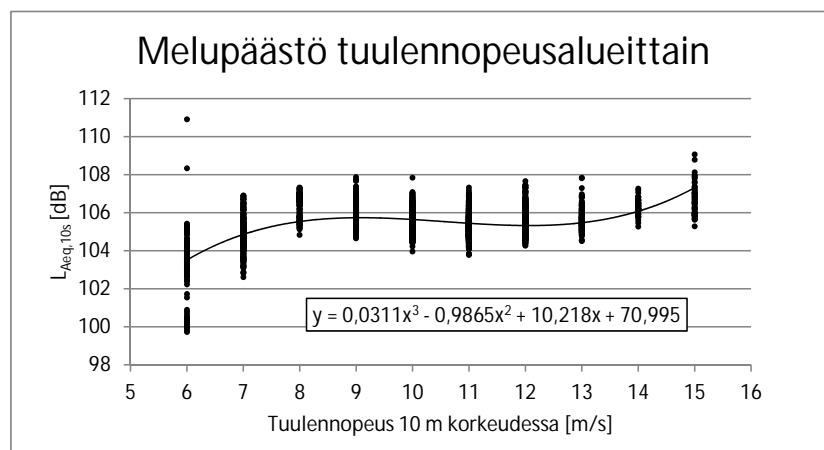
Kuva 14: Toisen mittauskäynnin emissiomittauksen aikainen tuulensuunta.



Kuva 15: Toisen mittauskäynnin emissiomittauksen aikainen tuulennopeus.

lennettua tuulennopeustietoa saatiin vain 10 minuutin jaksoilta, ei taustamelutasomittaus ollut käyttökelpoinen. Lisäksi pysäytykset tehtiin klo 18-19 välisenä aikana, jolloin suurimmaksi osaksi valtatie 4:stä johtuva taustamelutaso oli vielä melko korkea. Jälkeenpäin voi todeta, että taustamelutasomittaus olisi pitänyt tehdä yöaikaan. Tuulivoimaloiden pysäyttäminen mittausohjeiden vaatimusten mukaisten taustamelumittausten tekemiseksi ei kuitenkaan ollut mahdollista, joten tämäkään muutos mittausjärjestelyihin ei olisi tuonut suurta parannusta mittauksen edustavuuteen. Mittaustulosten taustamelukorjaus jätettiin analyysissä tekemättä sen vaillinaisen edustavuuden johdosta. Toinen syy oli se, ettei ulkoimmissiomittauspisteessäkään tehty taustamelumittausta, joten taustamelukorjaamattomat keskiäänitasot olivat paras mittauksista saatu vertailupari. Lyhyistä taustamelumittauksista nähtiin kuitenkin, että taustamelutaso oli lähes 10 desibeliä alhaisempi kuin melutaso mitattavan voimalan ollessa toiminnassa. Näin voidaan todeta, etteivät käynnissä olleet muut voimalat merkittävästi vaikuttaneet emissiomittauksen tuloksiin.

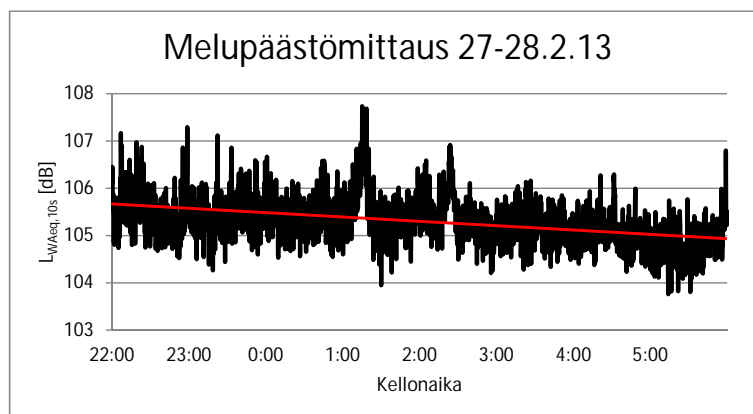
Kuvaan 16 on koostettu klo 19-8 mitatut melupäästöt tuulennopeusalueittain. Napakorkeudella mitatut tuulennopeudet on aluksi muunneltu vastaamaan tuulennopeutta 10 metrin korkeudessa käyttäen kaavaa 23, johon on sijoitettu lumelle



Kuva 16: Toisen mittauskäynnin melupäästömittaustulokset tuulialueittain.

tarkoitettua karheustermien arvo $z_0 = 0,0001$. Tämän jälkeen A-painotetut mittaustulokset on jaettu mittauksen aikana vallinneen tuulennopeuden perusteella tuulennopeusalueisiin. Kuvasta nähdään, että tuulennopeus ei vaikuttanut mittauksen aikana melupäästöön juurikaan nopeusalueilla 8 - 12 m/s. Tämän alueen alapuolella ja yläpuolella tuulennopeuden lisääminen kasvatti myös tuulivoimalan tuottamaa melupäästöä.

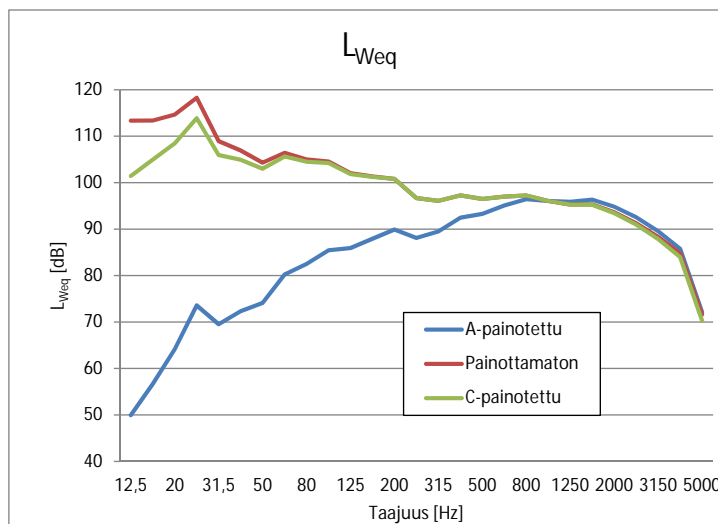
Kuvaan 17 on piirretty klo 22-6 välisenä aikana kymmenen sekunnin välein mitatuista ekvivalenttitasoista yhtälöllä 24 lasketut OL3-voimalan A-painotetut melupäästöarvot. Kuvaajasta nähdään, että OL3:sen melupäästö pieneni hieman yön kuluessa. Luultavasti tämä johtuu taustamelutason vähenemisestä sekä keskituulennopeuden pienenemisestä yön kuluessa.



Kuva 17: Toisen mittauskäynnin melupäästömittaustulokset kymmenen sekunnin välein tallennettuina F-aikapainotettuina ja A-taajuuspainotettuina keskiäänitasoina.

Kuvassa 18 näkyy klo 22-6 välisenä aikana tehdyssä mittauksessa saatu OL3:n melupäästö terssikaistoittain eri taajuuspainotuksilla. Kuva on hyvin samankaltainen kuin edellä esitetty usean tuulivoimalan melupäästömittauksista koostettu kuva

9. Suurimpana erona tässä kuvassa näkyvä korostuma 25 Hz terssikaistalla. Koko kahdeksan tunnin aikana mitatuista keskiäänitasoista $L_{Aeq,10s}$ laskettuna tuulivoimalan äänitehotasoksi saatiin 105,3 dB.

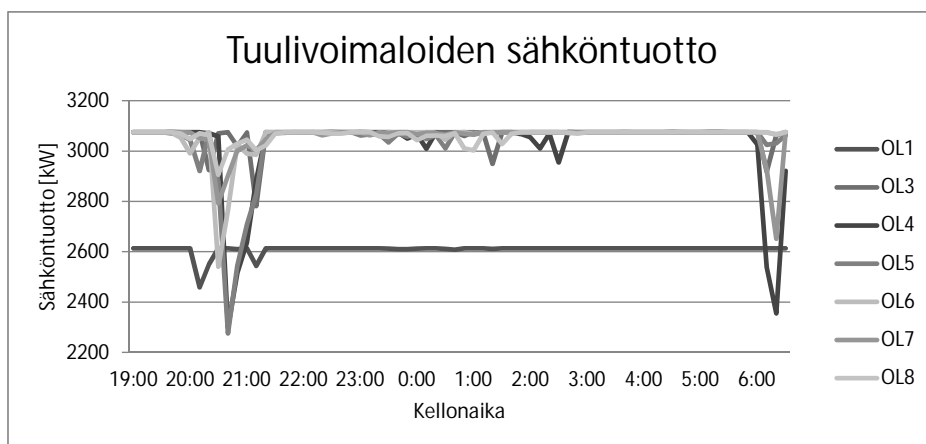


Kuva 18: Melupäästömittauksen aikainen mitattu tuulivoimalan äänitehotaso terssikaistoittain eri taajuuspainotuksilla.

4.2 Immissiomittaukset

Tässä osiossa käydään läpi tuulivoimapuiston keskellä sijaitsevalla sähköistämättömällä kesämökillä tehtyjä altistuvan kohteen melumittauksia. Molemmilla mitauskäynneillä kohteessa suoritettiin immissiomittauksia sekä sisällä että ulkona. Kaikissa mittauksissa käytettiin ensimmäisen luokan äänitasomittareita, jotka tallensivat keskiäänitasoa sekunnin välein käyttäen F-aikapainotusta. Mittauskorkeus oli 1,5 metriä. Ensimmäisellä mitauskerralla sisämittaukset suoritettiin pienessä nukkuma-aitassa ja toisella kerralla suuremmassa hirsimökissä. Ulkomittaukset suoritettiin molemmilla kerroilla näiden rakennusten pihapiirissä. Ensimmäisellä mitauskäynnillä melupäästömittauksesta saatu tuulivoimalan tehotaso oli niin alhainen, ettei immissiomittauksien esittäminen tässä ole mielekästä. Toisen mitauskäynnin tulokset ovat huomattavasti edustavampia ja näin ollen tässä työssä on keskitytty niiden tarkasteluun.

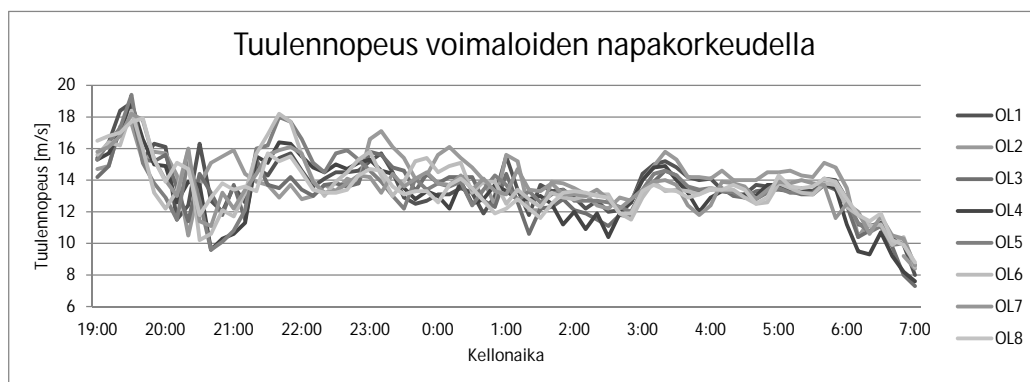
Immissiomittauksia toteutettiin samanaikaisesti sisällä ja ulkona kahtena yönä 27.2-1.3.2013. Lisäksi ulkomittauksia tehtiin aamuyöstä 26.2.2013, mutta voimakas puuskittainen tuuli aiheutti voimakasta tuulikohinaa mikrofonin tuulisuojoissa sekä mittauspisteen läheisissä puissa. Näin ollen tämä mitausdata oli pääasiassa käytökelvotonta. Melupäästömittauksien kanssa samanaikaisesti toteutettiin altistuvan kohteen mittauksia sekä sisällä että ulkona. Kuvassa 19 on esitetty puiston tuulivoimaloiden sähköntuotto melupäästömittauksen aikana. OL2 ei ollut toiminnassa mittauksen aikana. Voimalassa OL1 oli mittauksien aikana käytössä tehorajoitus, jo-



Kuva 19: Melupäästömittauksen aikainen tuulivoimaloiden sähköntuotto.

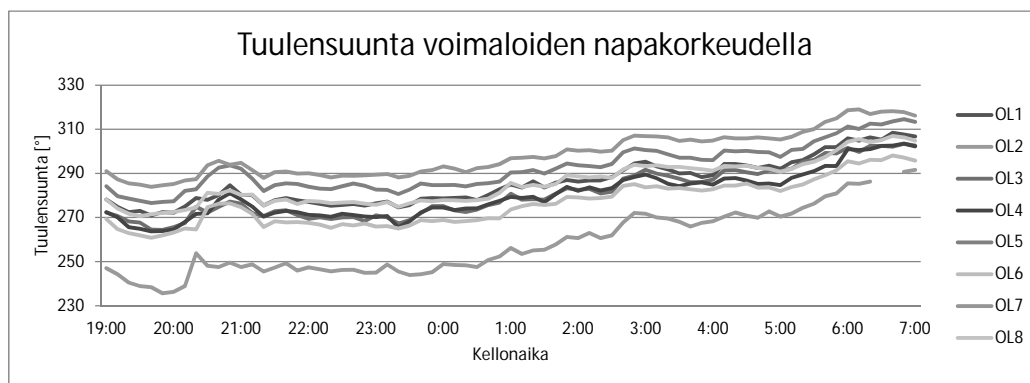
ka rajoitti voimalan tehon 2,7 megawattiin. Kuvasta voidaan todeta, että voimalat kävivät lähes koko melupäästömittauksen ajan maksimiteholla.

Kuten emissiomittauksissa, niin myös altistuvan kohteen melumittauksissa mitaustulokset tulisi mittausohjeistuksen mukaan esittää tuulennopeusalueittain. Tämä menetelmä on suunniteltu ilmeisesti vain yhdelle tuulivoimalalle tehtäviä mittauksia silmällä pitäen ja tässä mittauksessa toiminnassa oli useita voimaloita, jotka vaikuttivat altistuvan kohteen melutasoon. Näin ollen keskiäänitason määrittäminen tuulennopeusluokittain ei ollut mahdollista. Tästä syystä altistuvan kohteen mitaustuloksien tarkastelussa on tässä työssä tyydytty tarkastelemaan ainoastaan keskiäänitasoa ilman keksiäänitason erittelyä eri tuulennopeusalueisiin. Immissiopisteessä ei tehty taustamelumittauksia. Melupäästömittauksen voimalapysäytyksestä ei ollut hyötyä altistuvan kohteen taustamelumittaukselle, sillä mittauspistettä lähin voimala OL4 oli toiminnassa koko mittauksen ajan.



Kuva 20: Melupäästömittauksen aikainen tuulennopeus voimaloiden napakorkeudella.

Kuvista 20 ja 21 nähdään, että tuuliolosuhteet olivat mitausten aikana samankaltaiset kaikkien tuulivoimaloiden kohdalla. Ainoa eroavaisuus voimaloiden tuulioiloissa oli tuulensuunta. Kuten kuvasta nähdään, tuulensuunta vaihteli voimaloiden



Kuva 21: Melupäästömittauksen aikainen tuulensuunta voimaloiden napakorkeudella.

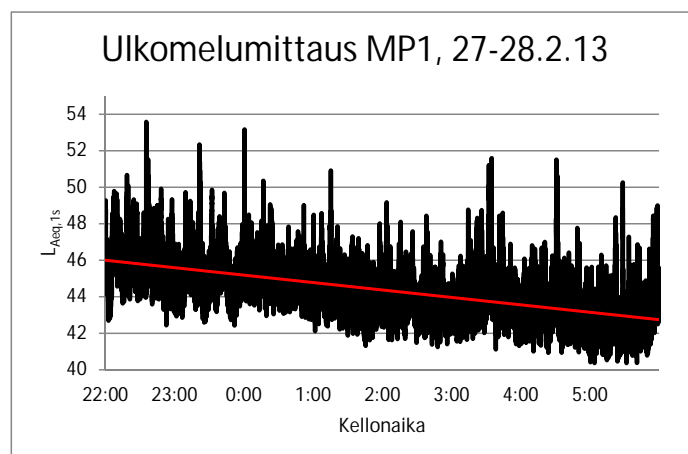
kohdalla samansuuntaisesti, mutta tuulensuuntien välinen ero pysyi lähes vakiona.

Tuulitiedot on saatu voimaloiden anemometreistä, jotka sijaitsevat tuulipuiston voimaloiden napojen päällä ja ovat lapojen takana suhteessa tuuleen. Tällaisen tuulimittauksen ongelmana on, että napa ja lavat vaikuttavat tuulen virtaukseen. Tästä syystä tällaisessa paikassa sijaitsevan anemometrin antama tuulimittaustulos ei täsmällisesti edusta voimalan lapojen kokemaan vapaasti virtaavan tuulen nopeutta. Anemometriä antamat mittaukset voidaan kalibroida vastaamaan vapaasti virtaavan tuulen nopeutta. Kalibrointi vaatii erillisellä mastolla tehtäviä tuulimittauksia. Vapaasti virtaavaa tuulennopeutta vastaamaan kalibroituilla anemometreillä ei voida tehdä taustamelumittauksen aikaisia tuulisuusmittauksia, sillä anemometri ei kalibroinnista johtuen anna oikeita tuulimittauksia voimalan ollessa pysähdyksissä. [49] [52]

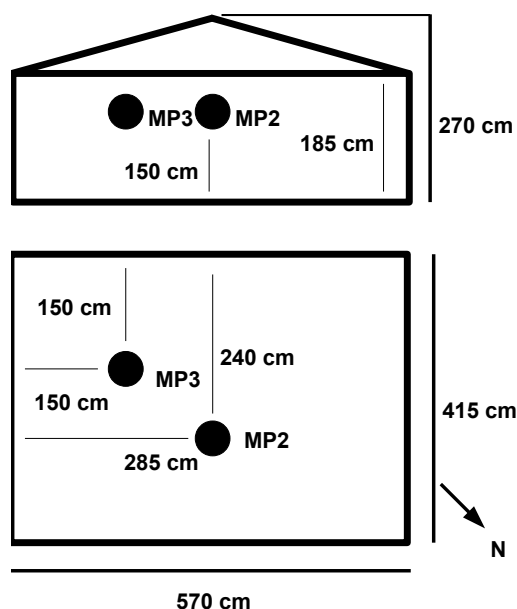
Ulkomittauspiste sijaitsi mökin läheisyydessä sen koillispuolella. Ulkoimmissiommittaukset pyrittiin suorittamaan Ympäristöministeriön ympäristömelun mittausohjeen [53] mukaisesti. Kuva 22 esittää ulkomittauspisteessä mitatut sekunnin välein tallennetut ekvivalenttitasot. Kuvia 17 ja 22 vertaamalla voidaan todeta, että tuulivoimalan melupäästön asteittainen väheneminen näkyy myös mökin luona mitatussa keskiäänitasossa. Mittausjakson aikainen keskiäänitaso oli $L_{Aeq,1s} = 44,6$ dB. Pientaajuuden melun osuuden arvioimiseksi laskettiin mittausjakson C-painotetun keskiäänitason ja A-painotetun keskiäänitason erotus, joka oli 13 desibeliä. Näin ollen pienet taajuudet eivät olleet melussa doiminoivia.

Sisämittauksiin oli varauduttu molemmilla mittauskerroilla kahdella mittauspisteellä. Sisämittaukset pyrittiin tekemään Asumisterveysohjeen [54] mittausohjeistuksen mukaisesti. Toisen mittauskäynnin sisämittauspisteiden sijainnit on merkitty kuvaan 23. Ensimmäisen yön sisämittauksien käsittelyn yhteydessä huomattiin, että mittauspisteessä 3 (MP3) sijainneen äänitasomittarin dynaaminen alue oli asetettu virheellisesti. Tämän johdosta tällä mittarilla saadut ensimmäisen yön mittaukset olivat käyttökeltottomia. Asumisterveysohjeen vaatimus melun mittaamisesta useassa kohdassa huonetta hiljaisen tai pientaajuuden melun tapauksessa ei näin ollen ensimmäisen yön sisämittauksissa täyttnyt.

Ensimmäisen yön sisämelumittaukset melupäästömittauksen aikajaksolta



Kuva 22: Melupäästömittauksen kanssa samanaikaisesti ulkona mitattu A-painotettu keskiäänitaso altistuvassa kohteessa mittauspisteessä 1 (MP1).

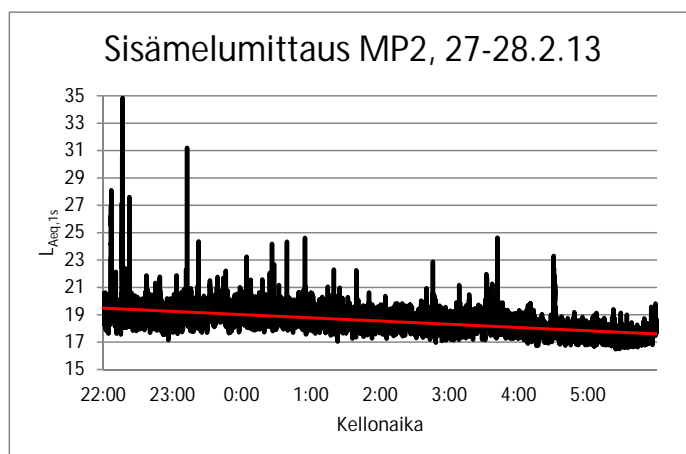


Kuva 23: Toisen mittauskäynnin sisämittauspisteiden sijainnit.

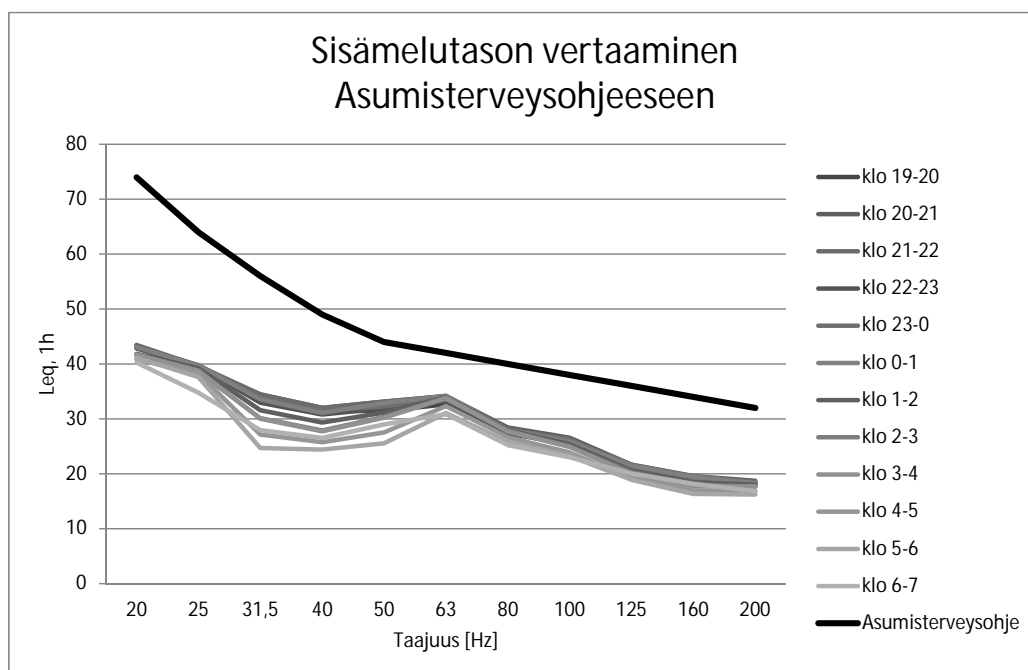
on esitetty kuvassa 24. Kuvasta nähdään, että myös sisämelun hetkellinen keskiäänitaso hieman laski aamua kohti. Mittausjakson keskiäänitaso oli $L_{Aeq,1s} = 18,6$ dB. Kuvaajassa näkyvät piikit ovat ulkokuistilta sisälle kuuluneita tuulen aiheuttamia esineiden kolahduksia. Näiden impulssimaisten kolahdusten vaikutus keskiäänitasoon ei ole merkittävä.

Kuvassa 25 on mittauksia verrattu Asumisterveysohjeessa annettuihin pien- ja taajuisen melun ohjearvoihin. Kuvaajasta nähdään, että pienillä taajuuksilla sisämelutaso jää selvästi ohjearvojen alapuolelle.

Kuvassa 26 on laskettu ulko- ja sisämelupisteessä 27.2.13 klo 22-6 mitattujen pientaajuuksien terssikaistakohtaisten A-painotettujen keskiäänitasojen erotukset.

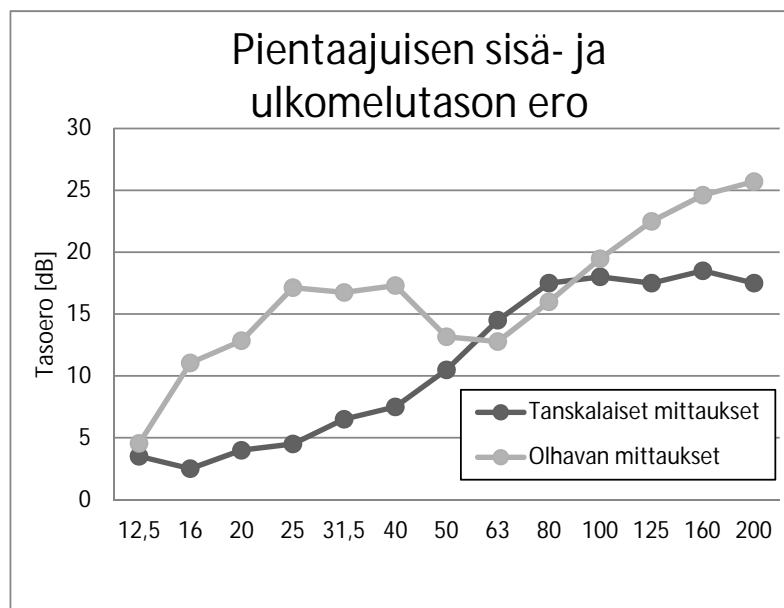


Kuva 24: Melupäästömittauksen aikana mitattu sisämelutaso mittauspisteessä 2 (MP2).



Kuva 25: Sisämelumittauspisteessä 2 (MP2) mitatun melutason vertaaminen Asumisterveysohjeen pientaajuuden melun terssikaistoittaiseen ohjearvoon.

Tästä on saatu arvio sille, kuinka hyvä on mökin ääneneristys. Kuvaajaan on piirretty myös tanskalaisille asunnoille ilmoitettu vähimmäiseristävyyden arvo, jonka 80-90 prosenttia tanskalaisista asunnoista oletetaan ylittävän. Tämä tarkoittaa sitä, että noin 80-90 prosentissa tanskalaisista asunnoista ääneneristys on kuvaajan arvoja parempi. Kuvasta nähdään, että mökin ääneneristys oli jopa yllättävän hyvää luokkaa. Kyseessä oli vankkarakenteinen hirsimökki, joten hyvä eristys johtune rakenteiden paksuudesta.[55]



Kuva 26: Mitatun pientaajuuden sisä- ja ulkomelutason erotuksen vertaaminen tanskalaisiin tekemiin mittauksiin. [55]

4.3 Amplitudimodulaatio

Tuulivoimamelun amplitudimodulaation mittaamiseen ei ole käytössä mitään yleispätevää yleisesti hyväksyttyä menetelmää. Monia menetelmiä on vuosien saatossa ehdotettu. Osa menetelmistä soveltuu vain lyhytaikaisiin analyysihin ja toiset pidempiaikaisiin. Analyysissä käsitellään yleensä yhden voiman tuottamaa amplitudimodulaatiota. Tämän diplomityön puitteissa saatu mittausdata sisältää aina kaikkien tuulipuiston toiminnassa olevien tuulivoimaloiden aiheuttaman melupäästön, joten kaikkien kirjallisuudesta löytyvien menetelmien hyödyntäminen ei ole tällaiselle datalle aivan yksinkertaista ja suoraviivaista. Tässä osiossa käsitellään joitakin menetelmiä, joilla amplitudimodulaation voimakkuutta voidaan arvioida mittaus tuloksista. Laajakaistainen swish-amplitudimodulaatio on normaalia tuulivoimalan toiminnasta aiheutuvaa ääntä, jota oli mittausten aikana lähes jatkuvasti havaittavissa. Voimaloilla ajoittain esiintyvää jyminämäistä modulaatiota ei mittauksissa havaittu, joten tässä työssä analysoidaan vain swish-tyyppin amplitudimodulaatiota.

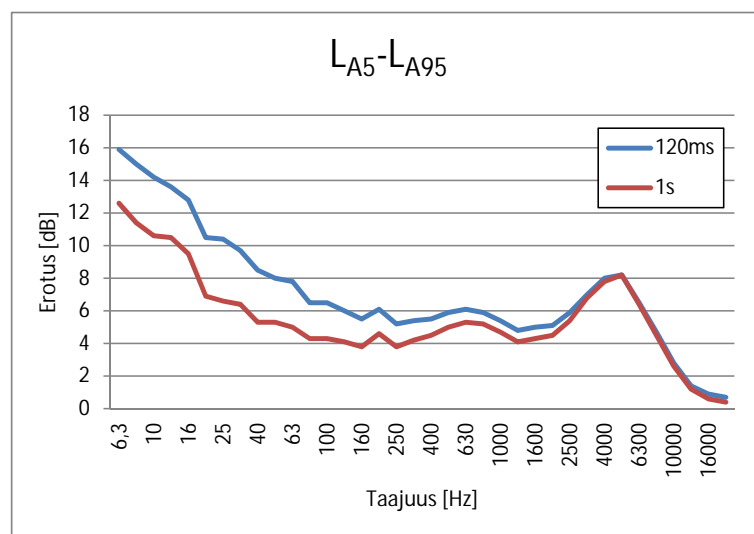
Moduloitunut ääni aiheuttaa ihmisessä ääniaistimuksen, joka riippuu modulaatiotaajuudesta. Jos modulaatiotaajuus on alle 20 Hz, havaitaan äänen vaihteluvoimakkuus. Jo 15 hertsin taajuudella toisen tyyppinen aistimus, äänen karheus alkaa lisääntyä ja 20 hertsin tuntumassa kuuloaistimus muuttuu asteittain äänen vaihteluvoimakkuudesta äänen karheudeksi. [56]

Amplitudimodulaation häiritsevyys liittyy juuri vaihteluvoimakkuuden havaitsemiseen. Yksinkertainen tapa tarkastella amplitudimodulaation suuruutta on tarkastella A-painotetun keskiäänitason maksimi- ja minimiarvojen L_{Amax} ja L_{Amin} erotusta. Tästä hieman tarkempi tapa on tarkastella minimin ja maksimin erotusta terssikaistoittain. Parempi vaihtoehto on tarkastella terssikohtaisten persentiilien

L_{A5} ja L_{A95} erotusta. L_{A5} antaa keskiäänitason, jonka viisi prosenttia mitatuista arvoista ylittävät ja L_{A95} antaa keskiäänitason, joka alittuu vain viidessä prosentissa mitatuista hetkellisistä äänitasoista. Persentiilit ovat maksimi- ja minimiarvoja stabiilimpia, sillä ne jättävät mittausjakson ääriarvot huomioimatta. [23]

Kuvaan 27 on ulkoimissipisteessä melupäästömittauksen aikaan klo 22-0 mitatulta jaksolta laskettujen terssikaistakohtasten keskiäänitason A-painotettujen persentiilien L_{A5} ja L_{A95} erotukset. Persentiilit on laskettu sekunnin ja 120 millisekunnin välein tallennetuille keskiäänitasoille. Kuvasta huomataan, että sekunnin tallennusvälillä mittausdatasta jäävät suurimmat amplitudivaihtelut huomioimatta. Pienimmillä taajuuksilla eri tallennusvälien antama tulos eroaa jopa neljä desibeliä.

Keskiäänitason tallennusväli T vaikuttaa siihen, mitkä modulaatiotaajuudet vaimenevat mittaustuloksista. Käytettäessä sekunnin tallennusväliä, vaimenevat jo 1 hertsin ja sitä suuremmat modulaatiotaajuudet. Jos tallennusväli on 120 millisekuntia, vaimeneminen alkaa 8,3 Hz kohdalla. Jos amplitudimodulaation analyysiä halutaan jatkaa edellä mainittuun 20 hertsiin asti, tallennusväli voi olla korkeintaan 50 millisekuntia. Modulaatiotaajuuden kasvaessa tallennusväliä tulisi tapauskohtaisesti pienentää. Yleisessä tiedossa on, että nykyaikaisten tuulivoimaloiden modulaatiotaajuus on 1 Hz:n luokkaa. Tällöin monista äänitasomittareista löytyvä 1/8 sekunnin tallennusväli on riittävä tuulivoimaloiden amplitudimodulaation arvioinnissa. [57]



Kuva 27: Eri keskiäänitason tallennusväleillä mitattujen keskiäänitasojen terssikaistatoittain laskettujen persentiilien L_{A5} ja L_{A95} erotukset.

Toinen yksinkertainen tapa arvioida amplitudimodulaatiota on tarkastella riittävän nopealla tallennusvälillä mitattua painottamatonta keskiäänitasoa. Tällaiseen tarkasteluun ei siis sekunnin tallennusväli ole riittävä, vaan suositeltava tallennusväli on esimerkiksi kahdeksasosasekunti (125 ms). Tällöin tutkitaan äänen vaihteluvoimakkuutta, jonka mittayksikkönä on vacil. Ihmiskorva on herkin modulaatiotaajuudelle 4 Hz. Vaihteluvoimakkuus, jonka suuruus on 1 vacil, saavutetaan amplitudi-

moduloidulla taajuudeltaan kilohertsin ja voimakkuudeltaan 60 desibelin siniäänellä, kun modulaatiotaajuus on 4 Hz ja modulaatioaste 100 %. [58]

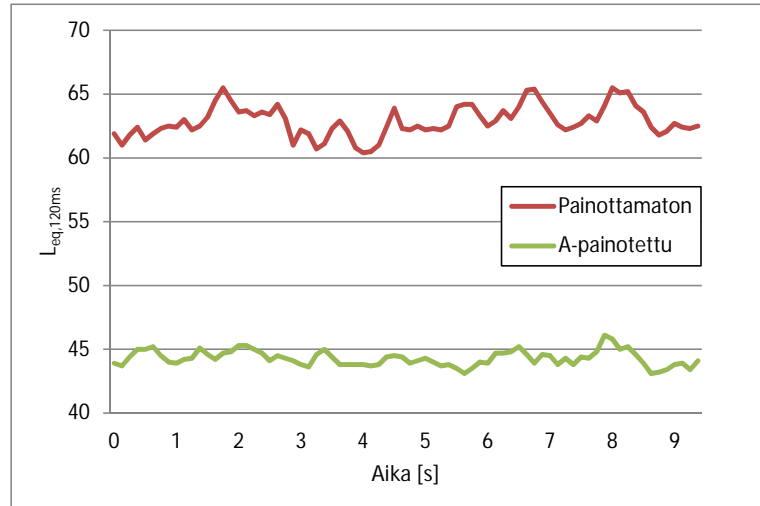
Tuulivoimamelun vaihteluvoimakkuuden laskentaan on ehdotettu hieman erilaisia menetelmiä, joista eräässä on käytetty A-painotettuja [23] ja toisessa painottamattomia keskiäänitasoja [57]. Molemmat menetelmät pohjautuvat sinimuotoisesti amplitudimoduloidun laajakaistaisen kohinan vaihteluvoimakkuuden F_{BBN} kaavaan [56]

$$F_{BBN} = \frac{5,8(1,25m - 0,25)(0,05L_{BBN} - 1)}{(f_m/5)^2 + (4/f_m) + 1,5}, \quad (25)$$

missä L_{BBN} on tarkastelujakson painottamaton keskiäänitaso ja f_m on modulaatiotaajuus, jonka voidaan yksinkertaisimmillaan olettaa olevan 1 Hz. Kaavassa m on modulaatiotekijä (englanniksi modulation factor tai modulation index), joka voidaan laskea yhtälöllä

$$m = \frac{10^{\frac{\Delta L}{20}} - 1}{10^{\frac{\Delta L}{20}} + 1}, \quad (26)$$

missä ΔL on keskiäänitason minimin ja maksimin erotus eli modulaatiosyvyys (englanniksi modulation depth). Amplitudimodulaation voidaan katsoa olevan merkittävää, jos $F_{BBN} \geq 0,2$ vacilia. [57]



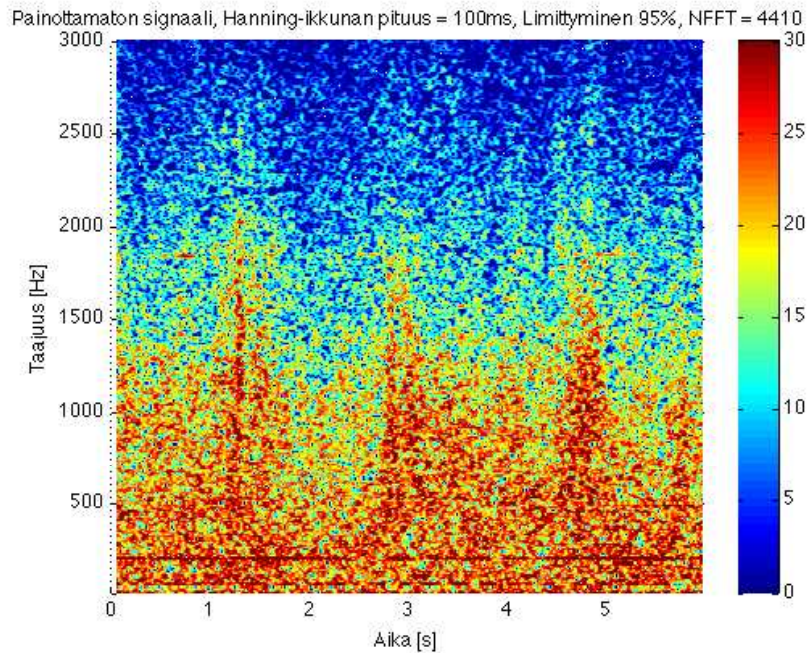
Kuva 28: Keskiäänitason tallennusvälillä 120 ms mitattu painottamaton ja A-painotettu keskiäänitaso, jossa näkyy amplitudimodulaatiota.

Lasketaan amplitudimodulaation vaihteluvoimakkuus kuvan 28 painottamattomalle ja A-painotetulle mittaustulokselle. A-painotetulle keskiäänitasolle käytetään samaa kaavaa ja ainoana erona edellä esitettyyn yhtälöön painottamaton taso korvataan A-painotetulla. Taulukkoon 6 on kirjattu saadut laskentatulokset. Tuloksista nähdään, että edellä esitetyn ehdon nojalla painottamattomasta keskiäänitasosta saadun laskentatuloksen mukaan näytteen amplitudimodulaatio on merkittävää. A-painotetun keskiäänitason laskentatulos puolestaan väittää, että amplitudimodulaatio ei ole merkittävää. Painottamattomalle keskiäänitasolle tehty amplitudianalyysi-

si korreloi paremmin subjektiivisen amplitudimodulaation aistimuksen kanssa kuin A-painotetun keskiäänitason analyysi [57].

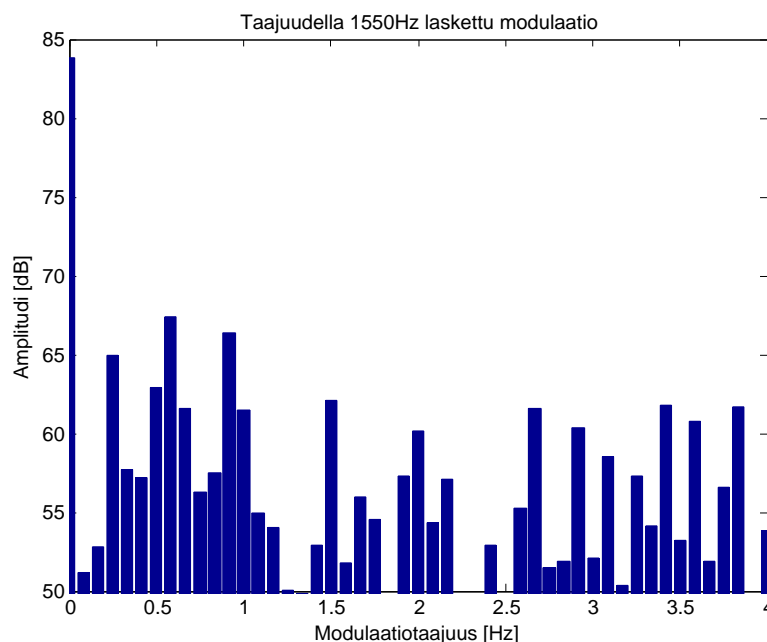
Taulukko 6: Amplitudivoimakkuuden vaihteluvoimakkuus A-painotetulle ja painottamattomalle mittaustulokselle.

| | L_{eq} [dB] | ΔL [dB] | f_m [Hz] | m | F [vacil] |
|----------------------|---------------|-----------------|------------|------|-------------|
| Painottamaton | 63,0 | 5,1 | 1 | 0,29 | 0,24 |
| A-painotettu | 44,3 | 3 | 1 | 0,17 | -0,04 |



Kuva 29: Immissiomittauksessa havaitun swish-amplitudimodulaation spektrogrammi.

Amplitudimodulaation voimakkuutta voidaan tarkastella myös spektrogrammin avulla. Se soveltuu kuitenkin vain lyhytaikaisen amplitudimodulaation tarkasteluun, sillä tarkan spektrogrammin piirtäminen vaatii runsaasti laskentatehoa. Kuvassa 29 on esitetty Olhavan immissiomittauksissa tallennetun swish-amplitudimodulaation spektrogrammi. Kuvan jakson ääninäytteessä on kuultavissa kolme "viuhahdusta". Kuvasta nähdään lisäksi, että tuulivoimala tuotti mittaushetkellä tonaalista melua taajuuksilla, jotka ovat noin 50 Hz ja 200 Hz. Swish-amplitudimodulaation spektrogrammitarkastelu ei vaadi yhtä suurta laskentatehoa kuin yksittäisellä taajuudella ilmenevän amplitudimodulaation analyysi. Koska swish-modulaatio ilmenee kuvan 29 mukaisesti laajalla taajuuskaistalla, saadaan se näkyviin jo alhaisellakin taajuusresoluutiolla. Kapealla taajuuskaistalla ilmenevän amplitudimodulaation tarkasteluun



Kuva 30: Swish-amplitudimodulaation spektrogrammista 1550 Hz kaistalle lasketun FFT-analyysin tulokset.

on ehdotettu menetelmää [59], jossa spektrogrammista lasketaan vielä uusi FFT yksittäiselle spektrogrammin taajuuskaistalle. Tämän toisen Fourier-muunnoksen avulla saadaan suoraan näkyviin taajuuskaistalla mahdollisesti ilmenevän amplitudimodulaation taajuus. Kuvassa 30 on esitetty edellä kuvatulla tavalla saadut imissiomittauksessa havaitun swish-amplitudimodulaation modulaatiotaajuudet taajuuskaistalla 1550 Hz. Kuvassa nähdään selkeät piikit taajuuksilla 0,25; 0,5 ja 1 Hz. Modulaatiopiikit näkyvät kuvassa kahden sekunnin välein, joten niiden taajuus on noin 0,5 Hz. Ensimmäisen ja kolmannen piikin väli on neljä sekuntia, mikä vastaa taajuutta 0,25 Hz. Analyysi näyttää myös perustaajuuden kerrannaiset, joten tästä syystä myös 1 Hz näkyy kuvaajassa voimakkaana piikkinä. Tällä menetelmällä on hankalaa saada swish-modulaation modulaatiotaajuus näkyviin, sillä modulaatio on jakautunut laajalle taajuuskaistalle ja se soveltuukin paremmin kapeakaistaisen modulaation tarkasteluun. Swish-modulaation olemassaolon toteamiseen ja taajuusalueen selvittämiseen riittää hyvin pelkkä spektrogrammitarkastelu.

5 Tuulivoimamelumallinnukset

Tässä osiossa käydään läpi melumallinnuksen yleisiä piirteitä sekä Olhavan tuulipuistolle tehtyjä melumallinnuksia ja niiden tuloksia. Aluksi tässä osiossa vertaillaan keskenään kahta eri mallinnusmenetelmää ISO 9613-2 ja Nord2000, sekä vertaillaan miten näissä menetelmissä erilaiset varioitavat olosuhdeparametrit vaikuttavat laskentatuloksiin. Tämän jälkeen vertaillaan edellisessä osiossa tehtyjen altistuvan kohteen ulkoimmissiomittausten tuloksia mallinnustuloksiin. Seuraavana käydään vielä läpi miten mittauksilla määritetyistä tuulivoimalan emissiotiedoista voidaan yksinkertaisella laskennalla arvioida melutasoa altistuvassa kohteessa. Osion lopussa käydään vielä läpi hieman tuulivoimamelumallinnusten nykyisiä käytäntöjä ja esitystapoja.

Melumallinnusta käytetään yleisesti ympäristömeluselvityksissä, kun halutaan esimerkiksi tarkastella jonkin rakennettavan kohteen melutasoja. Mallinnuksia tehdään myös jo olemassa oleville kohteille esimerkiksi jos korkea taustamelutaso vaikeuttaa mittausten tekemistä kohteessa. Ennen melumallin luomista tulee valita käytetty laskentaohjelma ja laskentamalli. Laskentamallin valinta vaikuttaa siihen, mitä ja miten eri olosuhdeparametreja mallissa voidaan varioida. Erilaisia yleisesti Suomessa käytössä olevia laskentamalleja ovat muun muassa ISO 9613-2, Nord2000, Concave ja Nordic Prediction Method.

Melumalli koostuu maastoaineistosta, melulähteistä, mahdollisista melusteistä ja ympäristöolosuhteista. Maastomalli puolestaan koostuu yleensä korkeuskäyristä, taiteviivoista, akustisesti koviksi tai pehmeiksi määritellyistä maanpinnoista sekä rakennuksista ja rakenteista. Maastomalli voidaan luoda korkeuskäyrien ja mahdollisten taiteviivojen pohjalta tai laserkeilatusta maastoaineistosta. Laserkeilattu aineisto koostuu korkeuspistedatasta. Sen tarkkuus on hyvä, mutta suuri datamäärä vaatii usein esikäsittelyä ja suodatusta, jottei mallista tule liian raskas käsiteltävä. Yleensä laserkeilattua aineistoa ei käytetä sellaisenaan, vaan korkeuspisteiden avulla muodostetaan korkeuskäyrät, joiden avulla maastomalli lasketaan. Korkeuskäyrien pohjalta mallinnusohjelma laskee maaston korkeustasot pintojen kolmioinnin avulla. Taiteviivoja voidaan hyödyntää kolmioinnin kriittisissä kohdissa, joissa kolmioinnin halutaan seuraavan korkeuskäyriä mahdollisimman tarkasti.

Malliin voidaan määritellä mitkä pinnat ovat kovia ja ääntä heijastavia, ja mitkä puolestaan ovat pehmeitä tai puolikovia ääntä absorboivia pintoja. Kovina pintoina mallinnetaan yleisesti vesistöt, väylät, pysäköintialueet ja mahdollisesti myös pihat. Myös ääntä heijastavat rakennukset ja rakenteet voidaan sisällyttää malliin. Rakennusten määrittelyssä melumalliin on tärkeää käyttää rakennuksille oikeita sijaintitietoja ja korkeuksia. Yleinen tapa on mallintaa tavalliset rakennukset kuuden metrin korkuisina, jotta suurten rakennusmäärien kohdalla määrittelystä ei tulisi liian työlästä.

Kun maastomalli on luotu ja sen pohjalta kolmioinnilla laskettu maastomallin korkeuskoordinaatit, voidaan malliin lisätä melulähteet. Yleensä melulähteet voivat mallinnusohjelmissa olla joko piste-, viiva tai aluelähteitä. Niille voidaan määrittää lähteen taajuusjakauma, suuntaavuus ja äänitehotaso. Lisäksi erilaisten aikahistogrammien avulla voidaan määrittää, milloin melulähteet tuottavat ääntä ja milloin

taas eivät. Mallinnusohjelmista löytyy yleensä valmiita lähdekirjastoja, mutta käyttäjä voi lisätä malliin myös omia melulähteitä.

Mallinnustilanteen ilmasto-olosuhteita voidaan varioida hieman eri tavalla ja eri laajuudessa laskentamallista riippuen. Yleisimmin muokattavia parametrejä ovat ainakin ilmanpaine, ilman suhteellinen kosteusprosentti ja ilman lämpötila. Tämän lisäksi voi mallista riippuen olla mahdollista varioida myös esimerkiksi lämpötilagradienttia sekä tuulennopeutta ja -suuntaa.

5.1 Olhavan tuulipuiston melumallinnukset

Tässä osiossa tarkastellaan Tuuliwatti Oy:n Iin Olhavan tuulipuiston melumallinnuksia, jotka on tehty osana tuulivoimamamelun ohjeistusprojektiin liittyvää mallinnusohjelmien ja -menetelmien vertailua. Tässä diplomityössä käsiteltävät mallinnukset on laskettu SoundPLAN 7.1 -melumallinnusohjelmalla käyttäen ISO 9613-2 ja Nord2000 -laskentamenetelmiä. Tarkastelun tavoitteena oli selvittää, miten lähtöarvoja tulisi mallinnuksessa soveltaa eri menetelmiä käytettäessä.

Tuulivoimapuiston ympäristön asutuista kohteista valittiin 11 altistuvaa kohdetta, joissa mallinnustulokset laskettiin. Kuvaan 13 on merkitty melun tarkastelupisteet sekä tuulivoimaloiden sijainnit mallinnuskohteessa. Lähin kohde oli tuulivoimapuiston keskellä sijaitseva sähköistämätön kesämökki, jonka etäisyys lähimpään tuulivoimalaan on noin 450 metriä. Kauimman pisteen etäisyys lähimpään tuulivoimalaan oli noin 1700 metriä. Taulukkoon 7 on kirjattu kunkin tarkastelupisteen etäisyydet kolmeen lähimpään tuulivoimalaan.

Taulukko 7: Mallinnuksen tarkastelupisteiden etäisyydet kolmeen lähimpään tuulivoimalaan.

| Tarkastelupiste | Voimala 1 [m] | Voimala 2 [m] | Voimala 3 [m] |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 999 | 1040 | 1418 |
| 2 | 1189 | 1700 | 2227 |
| 3 | 1146 | 1285 | 1383 |
| 4 | 454 | 582 | 888 |
| 5 | 1497 | 1929 | 2272 |
| 6 | 859 | 1571 | 1590 |
| 7 | 761 | 907 | 1097 |
| 8 | 835 | 996 | 1307 |
| 9 | 1288 | 1395 | 1733 |
| 10 | 1340 | 1395 | 1555 |
| 11 | 1702 | 1716 | 2177 |

Mallinnuksessa emissiotietona käytettiin kirjallisuudesta peräisin olevia Vestas V112 -voimalan mitattua terssikaistaspektriä [60]. Se on ilmoitettu 10 metrin referenssikorkeuden tuulennopeudella 8 m/s saavutettavana äänitehotasona. Mitattuun

tulokseen on vielä lisätty 0,5 desibelin varmuusmarginaali. Mallinnusta varten spektri muutettiin oktaavikaistoihin, sillä ISO 9613-2 kykenee käyttämään vain oktaavikaistoittain annettua spektritietoa.

5.2 Mallinnusmenetelmien vertailu

Mallinnusmenetelmät ISO 9613-2 ja Nord2000 eroavat toisistaan hieman hallittavien parametrien osalta. Etenkin tuulennopeuden ja -suunnan huomioonottaminen eri laskentamalleilla poikkeaa toisistaan erittäin paljon. Lisäksi nämä mallinnukset olivat osa laajempaa mallinnusvertailua ja projektissa käytetyt eri mallinnusohjelmat eroavat toisistaan muun muassa siinä, miten ISO 9613-2 -menetelmän tuuliolosuhteita syötetään malliin. Tästä syystä menetelmien vertailumallinnuksissa tuulensuunta ja -nopeus päätettiin jättää huomioimatta. Maastoaineiston vaakaresoluutioksi asetettiin 1 metri ja heijastusten lukumääräksi mallissa sovittiin yksi heijastus. Tämän lisäksi valittiin oletusparametrit, joita käytettiin mallinnustilanteissa, jos ei toisin mainita. Oletusarvot on esitetty taulukossa 8. Menetelmien suurimpana erona tehtyjen mallinnusten kannalta on se, että ISO 9613-2 -menetelmässä maaperän äänen etenemistä vaimentavaa ominaisuutta kuvastaa maavaimennuskerroin ja Nord2000 -mallinnusmenetelmässä tehollisen ominaisvirtausvastuksen mukaan määräytyvä impedanssiluokka. Lisäksi Nord2000 -menetelmässä maavaimennukseen vaikuttaa karheusparametri σ_r , jolle käytettiin kaikissa tämän työn yhteydessä tehdyissä mallinuksissa arvoa nolla.

Taulukko 8: Menetelmien vertailumallinnuksissa käytetyt oletusarvot.

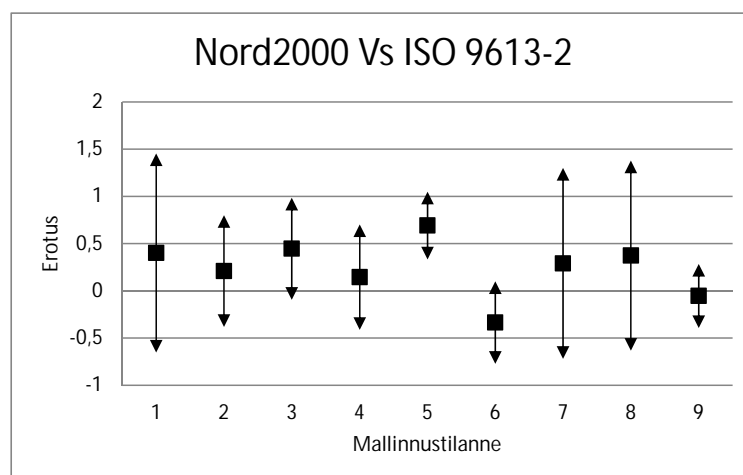
| | |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Lähde | pistelähde |
| Pystyresoluutio | 0,5 m |
| Maaperän vaimennus | $G = 0$ / Impedanssiluokka G |
| Immissiopisteen korkeus | $h = 2$ m |
| Ilman lämpötila | $T = 15$ °C |
| Ilman suhteellinen kosteus | $RH = 70$ % |

Molemmilla mallinnusmenetelmillä laskettiin oletusparametreillä saadun mallinnuksen lisäksi seitsemän mallinnusta, joissa yhtä parametrin arvoa varioitiin oletusparametreista poikkeavaksi. Lisäksi laskettiin yhdeksäs mallinnustilanne, jossa varioitiin kahta oletusparametria. Taulukossa 9 on esitetty eri mallinnustilanteissa käytetyt oletusarvoista poikkeavat parametrien arvot.

Mallinnustulosten vertailu on toteutettu laskemalla yhdessätoista immissiopisteessä mallinnettujen A-painotettujen keskiäänitasojen erotus eri mallinnustilanteissa. Tälle yhdentoista erotuksen joukolle on laskettu keskiarvo ja keskihajonta. Keskiarvo kuvastaa parametrien varioinnin aiheuttamaa keskimääräistä muutosta mallinnustuloksissa ja keskihajonta kuvaa miten tämä muutos vaihteli eri tarkastelupisteiden välillä.

Taulukko 9: Nord2000 ja ISO 9613-2 -mallinnusmenetelmien vertailumallinnuksen eri mallinnustilanteissa varioidut parametrit ja niiden saamat arvot.

| Mallinnustilanne | Muutettu parametri ja sen arvo |
|------------------|---|
| 1 | Oletusarvojen mukaiset parametrit |
| 2 | Maastomallin pystyresoluutio 1 m |
| 3 | Maastomallin pystyresoluutio 2,5 m |
| 4 | Maaperän vaimennus $G = 0,25$ / Impedanssiluokka E |
| 5 | Maaperän vaimennus $G = 0,5$ / Impedanssiluokka D |
| 6 | Immissiopisteen korkeus $h = 4$ m |
| 7 | Ilman lämpötila $T = 0$ °C |
| 8 | Ilman suhteellinen kosteus $RH = 30$ % |
| 9 | Tilanteiden 5 ja 6 oletusparametreista poikkeavat arvot |



Kuva 31: Nord2000:lla ja ISO 9613-2:lla laskettujen mallinnustilanteiden tulosten erotuksen keskiarvo ja keskihajonta.

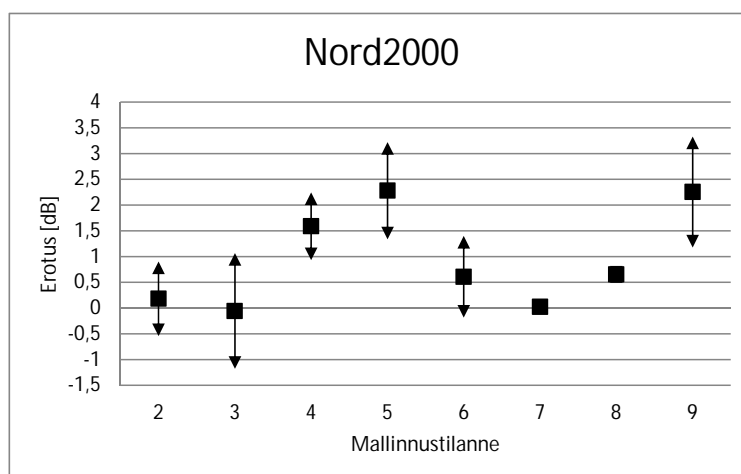
Kuvaan 31 on merkitty Nord2000 -menetelmällä ja ISO 9613-2 -menetelmällä laskettujen mallinnustilanteiden 11 tarkastelupisteessä laskettujen tulosten erotuksen keskiarvot (kuvassa neliöt). Keskihajontaa kuvaamaan on laskettu keskiarvon ja keskihajonnan summat ja erotukset (kuvassa nuolet), jotka kuvaavat miten paljon mallinnusten erotus eri mallinnustilanteissa vaihteli. Kuvasta nähdään, että maastomallin pystyresoluution pieni heikentäminen (mallinnustilanteet 2-3) ei merkittävästi vaikuttanut menetelmien antamien mallinnustulosten eroavaisuuksiin. Kun pystyresoluutiota huononnettiin lisää (mallinnustilanteet 1-2), kasvoi menetelmien antamien tulosten hajonta huomattavasti, mutta erotuksen keskiarvo pysyi lähes ennallaan. Maaperän vaimennuksen pieni lisääminen (mallinnustilanne 4) paransi mallinnustulosten yhteneväisyyttä menetelmien välillä. Kun vaimennusta vielä lisättiin (mallinnustilanne 5), parani menetelmien antamien tulosten eroavaisuuksien yhte-

neväisyys ja Nord2000 antoi kaikissa tarkastelupisteissä tasaisesti suurempia arvoja kuin ISO 9613-2. Laskentakorkeuden nostaminen (mallinnustilanne 6) puolestaan muutti asetelmia ja nyt ISO 9613-2 antoi tasaisesti suurempia mallinnustuloksia. Ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutokset (mallinnustilanteet 7 ja 8) eivät juurikaan vaikuttaneet menetelmien antamien mallinnustulosten erotukseen. Yhte-neväisimmät mallinnustulokset menetelmät antoivat, kun sekä laskentakorkeutta et-tä maavaimennusta kasvatettiin (mallinnustilanne 9) oletusarvoista.

Taulukkoon 10 on merkattu mallinnusmenetelmien eri tarkastelupisteissä anta-mien tulosten erotuksen keskiarvot ja keskihajonnat. Tulokset on pyöristetty yhden desimaalin tarkkuudella. Positiivinen luku tarkoittaa, että Nord2000 on antanut keskimäärin suurempia mallinnustuloksia.

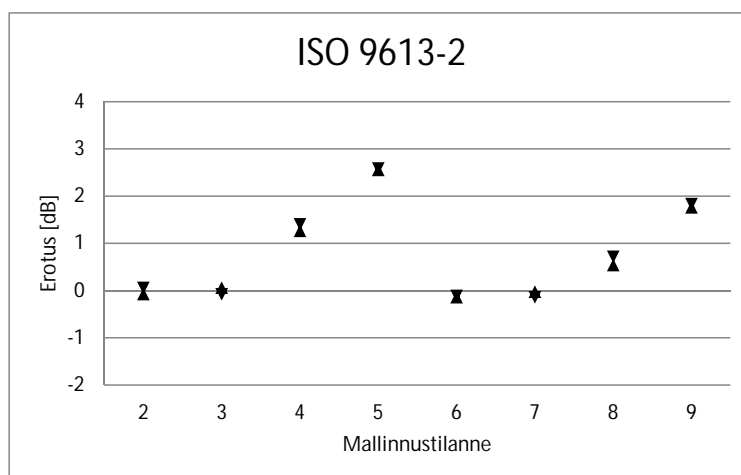
Taulukko 10: Nord2000- ja ISO 9613-2 -mallinnusten eri tarkastelupisteissä antamien tulosten erotusten keskiarvot ja keskihajonnat.

| Mallinnustilanne | Keskiarvo [dB] | Keskihajonta [dB] |
|------------------|----------------|-------------------|
| 1 | 0,4 | 1,1 |
| 2 | 0,2 | 0,6 |
| 3 | 0,4 | 0,5 |
| 4 | 0,1 | 0,6 |
| 5 | 0,7 | 0,4 |
| 6 | -0,3 | 0,4 |
| 7 | 0,3 | 1 |
| 8 | 0,4 | 1 |
| 9 | -0,1 | 0,3 |



Kuva 32: Nord2000:lla lasketun oletusarvomallinnuksen ja mallinnustilanteiden 2-9 tulosten erotuksen keskiarvo ja keskihajonta.

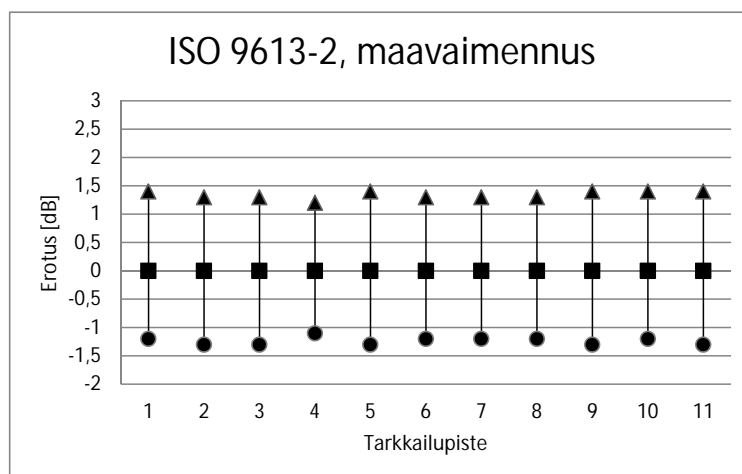
Kuvassa 32 näkyy Nord2000 -mallinnusmenetelmällä lasketun oletusarvomallinnuksen (mallinnustilanne 1) ja mallinnustilanteiden 2-9 mallinnustulosten erotuksen keskiarvo sekä keskihajonta edellisen kuvan tapaan. Kuvasta nähdään, että pystyresoluution heikentäminen (mallinnustilanteet 2 ja 3) muuttaa mallinnustuloksia jonkin verran. Mallinnustilanteessa 2 tähän on syynä oikeastaan vain tarkastelupiste 2, jossa paras pystyresoluutio (tilanne 1) antaa 2,3 dB suuremmat mallinnustulokset kuin heikompien pystyresoluutioiden mallinnukset. Heikoimmalla pystyresoluutiolla eli mallinnustilanteessa 3 myös muiden tarkastelupisteiden tulokset eroavat oletusarvomallinnuksesta huomattavasti. Maaperän ominaisvirtausvastusluokan kasvattaminen (mallinnustilanteet 4 ja 5) pienensi mallinnustuloksia kaikissa tarkastelupisteissä, mutta hieman vaihtelevasti. Myös laskentakorkeuden kasvattaminen (mallinnustilanne 6) keskimäärin pienensi saatuja tuloksia. Kuvasta nähdään, että parametrien variointi vaikutti kaikissa mallinuksissa hieman eri tavalla eri tarkastelupisteissä, lukuunottamatta mallinnustilanteita 7 ja 8. Lämpötilan pienentäminen (mallinnustilanne 7) ei vaikuttanut mallinnustuloksiin paljoakaan. Suhteellisen kosteusprosentin pienentäminen (mallinnustilanne 8) puolestaan pienensi mallinnustuloksia kaikissa tarkastelupisteissä yhteneväisesti. Ominaisvirtausvastusluokka E antoi melko yhteneväisiä tuloksia molemmilla käytetyillä laskentakorkeuksilla (tilanteet 5 ja 9).



Kuva 33: ISO 9613-2:lla lasketun oletusarvomallinnuksen ja mallinnustilanteiden 2-9 tulosten erotuksen keskiarvo ja keskihajonta.

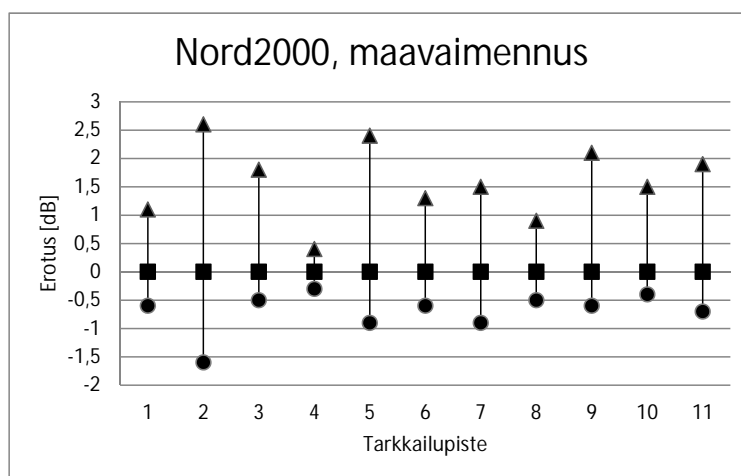
Kuvassa 33 on esitetty vastaavat ISO 9613-2 -menetelmän mallinnustulokset. Tuloksista nähdään, että menetelmällä mallinnustulokset reagoivat parametrimuutoksiin kaikissa tarkastelupisteissä samalla tavalla. Näin ollen esimerkiksi äänilähteiden ja tarkastelupisteiden etäisyys ei vaikuta siihen miten paljon A-painotetun keskiäänitason mallinnustulos pisteissä muuttuu. Muutokset ovat samankaltaisia kuin Nord2000 -menetelmän mallinuksissa, mutta tulosten keskihajonta on olematonta.

Sama nähdään kuvasta 34 jossa on esitetty eri maavaimennuksilla laskettujen mallinnustulosten (mallinnustilanteet 1 ja 5) erotus verrattuna maavaimennuksen arvoon $G = 0,25$ (mallinnustilanne 4). Kuvasta nähdään, että maavaimennuksen arvo nolla antaa kaikissa tarkastelupisteissä lähes 1,5 desibeliä suurempia mallin-



Kuva 34: ISO 9613-2:lla lasketun oletusarvomallinnuksen ja maavaimennusta varioivien mallinnustilanteiden (4 ja 5) tulosten erotus kussakin tarkastelupisteessä. Kuvassa nuolet kuvaavat tilannetta $G = 0$, neliöt tilannetta $G = 0,25$ ja ympyrät tilannetta $G = 0,5$.

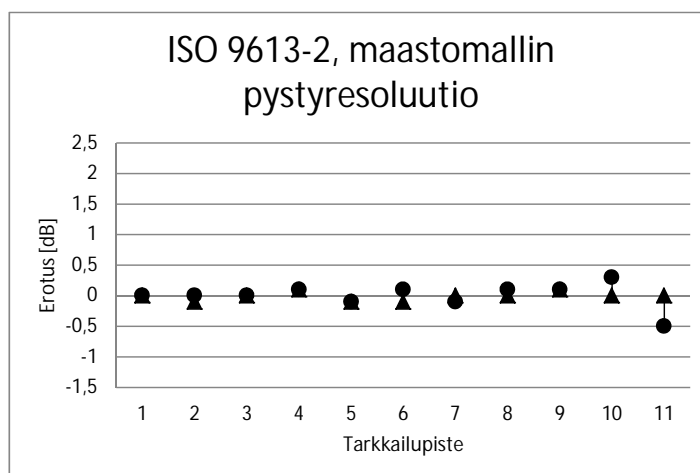
nustuloksia kuin maavaimennus 0,25. Maavaimennuksen arvo 0,5 puolestaan antaa hieman yli desibelin pienempiä mallinnustuloksia kuin maavaimennus 0,25.



Kuva 35: Nord2000:lla lasketun oletusarvomallinnuksen ja maanpinnan ominaisvirtausvastusluokkaa varioivien mallinnustilanteiden (4 ja 5) tulosten erotus kussakin tarkastelupisteessä. Kuvassa nuolet kuvaavat mallinnustilannetta, jossa impedanssi-luokka on G , neliöt luokkaa E ja ympyrät mallinnusta, jossa luokka on D .

Kuva 35 puolestaan kertoo, että Nord2000 menetelmässä maanpinnan ominaisvirtausvastus vaikuttaa eri tarkastelupisteissä eri tavalla. Esimerkiksi tarkkailupisteessä 4, joka sijaitsee tuulivoimapuiston keskellä, ei mallinnustuloksen kannalta ole juuri merkitystä, mikä maavaimennuksen arvo on. Pisteessä 2 sen sijaan eri maavaimennuksilla saadaan huomattavasti toisistaan poikkeavia mallinnustuloksia. Näin

ollen Nord2000 selvästi reagoi mallinnusolosuhteisiin eri pisteissä eri tavalla, toisin kuin ISO 9613-2, jossa parametrimuutokset vaikuttavat mallinnustuloksiin kaikissa pisteissä lähes saman verran.



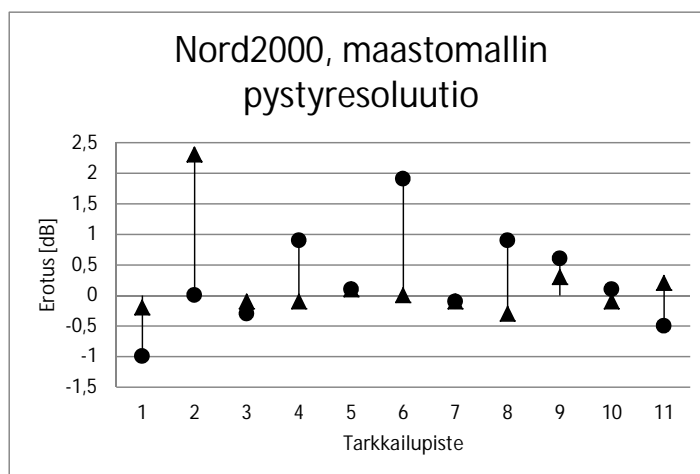
Kuva 36: Eri maastomallin pystyresoluutiolla laskentamallilla ISO 9613-2 saatujen mallinnustulosten vertailua. Kuvassa kolmiot osoittavat 0,5 metrin pystyresoluutiolla saatuja tuloksia (mallinnustilanne 1) ja ympyrät pystyresoluutiolla 2,5 metriä (mallinnustilanne 3) saatuja tuloksia verrattuna metrin pystyresoluution antamiin laskentatuloksiin.

Kuvassa 36 näkyy ISO 9613-2 -menetelmällä eri maastomallin pystyresoluutioilla laskettujen mallinnustulosten vertailua kussakin tarkastelupisteessä. Kuvaan on laskettu 0,5 metrin pystyresoluutiolla (mallinnustilanne 1) ja 2,5 metrin pystyresoluutiolla (mallinnustilanne 3) laskettujen mallinnustulosten ja pystyresoluutiolla 1 metriä (mallinnustilanne 2) laskettujen tulosten erotus kussakin tarkastelupisteessä. Kuvasta nähdään, ettei maastomallin pystyresoluution varioiminen juurikaan vaikuttanut mallinnustuloksiin, kun käytössä oli ISO 9613-2.

Kuvassa 37 on esitetty vastaavat tulokset laskettuna Nord2000 menetelmällä. Kuvasta nähdään, että pystyresoluutio vaikuttaa merkittävästi menetelmän antamiin mallinnustuloksiin. Vain neljässä tarkastelupisteessä (pisteet 1, 3, 5 ja 7) pystyresoluutiolla ei ollut juurikaan vaikutusta mallinnustuloksiin.

5.3 Sääparametrien herkkiystarkastelu (Nord2000)

Nord2000 -laskentamallille toteutettiin herkkiystarkastelu, jossa selvitettiin vielä hieman tarkemmin, miten eri parametrien variointi vaikuttaa laskentatuloksiin. Tarkastelun lähtökohtana oli varioida yhtä parametriä kerrallaan ja selvittää, miten paljon kukin parametri vaikuttaa laskentatuloksiin. Herkkiystarkastelu tehtiin, kuten mallinnusmenetelmien vertailukin, oktaavikaistoittain. Mallinnukset toteutettiin suurimmaksi osaksi käyttäen ominaisvirtausvastusluokkia G ja E. Tehdyissä mallinuksissa kuitenkin huomattiin, että ominaisvirtausvastusluokalla G mallinnus käyttäytyy useissa tilanteissa epäloogisesti. Se esimerkiksi antoi vastatuuleen mallinnet-



Kuva 37: Eri maastomallin pystyresoluutiolla laskentamallilla Nord2000 saatujen mallinnustulosten vertailuaen. Kuvassa kolmiot osoittavat 0,5 metrin pystyresoluutiolla saatuja tuloksia (mallinnustilanne 1) ja ympyrät 2,5 metrin pystyresoluutiolla (mallinnustilanne 3) saatuja tuloksia verrattuna metrin resoluutiolla laskettuihin tuloksiin.

taessa suurempia arvoja kuin myötätuuleen. Lisäksi negatiivisella lämpötilagradientilla saatiin suurempia tuloksia kuin käytettäessä positiivista lämpötilagradienttia (inversiotilanne) tai arvoa nolla. Lisäksi myötätuulen huomioiminen pienensi mallinnuksella saatuja A-painotettuja keskiäänitasoja tuulettomaan tilanteeseen nähden ja taso pieneni tuulennopeuden kasvaessa arvosta 6 m/s arvoon 10 m/s. Ominaisvirtausvastusluokka D otettiin mukaan tarkasteluun vertailumallinnusten jälkeen, kun huomattiin, miten yhteneväisiä mallinnustuloksia sillä ja ISO 9613-2 -menetelmän maavaimennuksen arvolla 0,5 saatiin. Taulukosta 11 löytyvät mallinnuksissa käytetyt oletusparametrit, jotka ovat osittain samoja kuin edellisen osion mallinnuksissa. Lisäksi taulukossa on Nord2000 -menetelmässä varioitavia parametrejä, joita ISO 9613-2 -menetelmä ei pidä sisällään. Tuulensuunnaksi mallinnusohjelmassa valittiin myötätuuli, jolloin ohjelma tekee laskennat olettaa tuulen suunnan olevan aina kustakin melulähteestä kohti tarkastelupistettä.

Herkkyystarkastelussa varioitaviksi parametreiksi valikoituivat lähdeyyppi, turbulenttisuus, tuulennopeus, lämpötilagradientti ja maaperän karheus. Tarkastelussa tehtiin yhdeksän mallinnusta varioiduilla parametreillä ja näitä verrattiin jälleen oletusparametrien antamiin mallinnustuloksiin. Taulukkoon 12 on merkitty eri mallinnustilanteissa varioidut parametrit ja niiden saamat arvot. Mallinnustilanteiden eroavaisuuksia kuvattiin jälleen keskiarvon (kuviissa neliöt) ja keskihajonnan avulla samaan tapaan kuin aiemminkin. Keskihajontaa kuvaamaan käytettiin siis jälleen keskiarvon ja keskihajonnan summaa ja erotusta (kuviissa nuolet).

Laskennat suoritettiin kolmella eri laskentakorkeuden ja impedanssiluokan arvoparilla. Kuvassa 38 on esitetty kahden metrin laskentakorkeudella ja impedanssiluokalla E tehdyn oletusarvomallinnuksen ja varioiduilla parametreillä tehtyjen mallinnusten tulosten erotuksen keskiarvot ja hajonnat. Kuvasta 38 nähdään, ettei

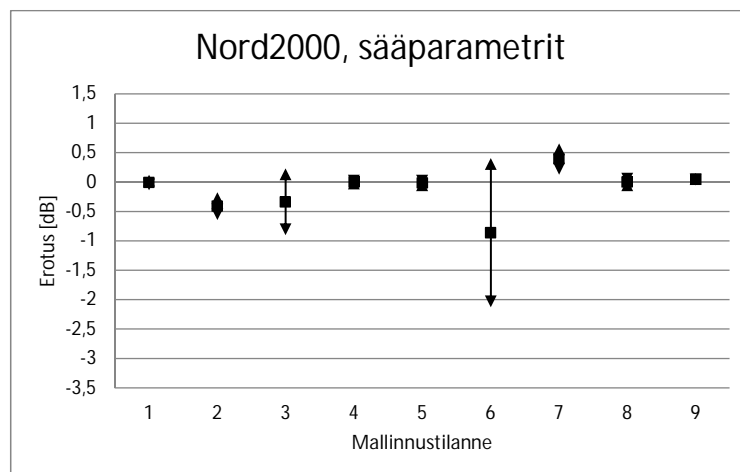
Taulukko 11: Nord2000 -menetelmän herkkyystarkastelumallinnuksissa käytetyt oletusarvot.

| | |
|------------------------------------|--|
| Lähdetyyppi | Pistelähde |
| Pystyresoluutio | 0,5 m |
| Ilman lämpötila | $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| Ilman suhteellinen kosteus | $RH = 70\text{ }\%$ |
| Tuulennopeus | $u = 8\text{ m/s}$ |
| Tuulennopeuden keskihajonta | $S(u) = 1,2\text{ m/s}$ |
| Tuulensuunta | $uDir = \text{myötätuuli}$ |
| Turbulenttisuus | $C_w^2 = 0,12\text{ m}^{3/4}/\text{s}^2$ $C_t^2 = 0,008\text{ K/s}^2$ |
| Lämpötilagradientti | $dT/dz = 0\text{ K/m}$ |
| Maaperän karheustermi | $z_0 = 0,05\text{ m}$ |

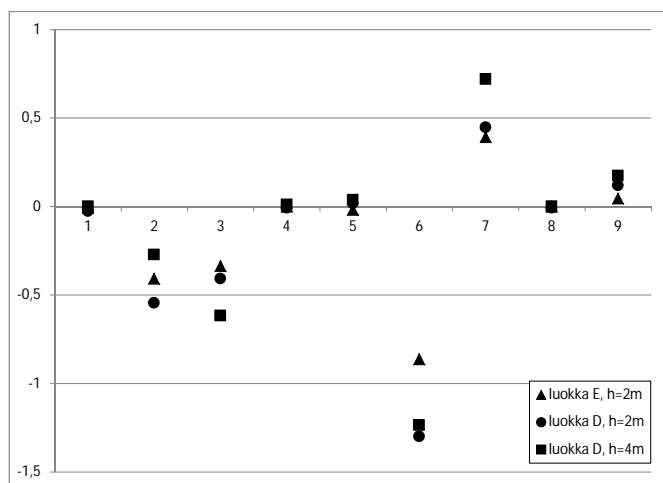
Taulukko 12: Nord2000 -menetelmän herkkyystarkastelun eri mallinnustilanteissa varioidut parametrit ja niiden saamat arvot

| Mallinnustilanne | Muutettu parametri ja sen arvo |
|-------------------------|---|
| 1 | Lähdetyyppi = Pystysuorat viivalähteet |
| 2 | Turbulenttisuus: $C_w^2 = 0$ ja $C_t^2 = 0$ |
| 3 | Tuulennopeus $u = 0\text{ m/s}$ |
| 4 | Tuulennopeus $u = 6\text{ m/s}$ |
| 5 | Tuulennopeus $u = 10\text{ m/s}$ |
| 6 | Lämpötilagradientti $dT/dz = -0,1\text{ K/m}$ |
| 7 | Lämpötilagradientti $dT/dz = +0,1\text{ K/m}$ |
| 8 | Maaperän karheus $z_0 = 0,01\text{ m}$ |
| 9 | Maaperän karheus $z_0 = 0,3\text{ m}$ |

pystysuorien viivalähteiden käyttö (mallinnustilanne 1) tuonut teorian perusteella oletettua 3 desibelin lisäystä mallinnustuloksiin, vaan tulokset olivat lähes samoja kuin käytettäessä pistelähteitä. Mallinnettujen voimaloiden roottorin halkaisija oli 112 metriä. Mallinnuksessa oletettiin, että tuulivoimalan lapa tuottaa ääntä 90 prosenttia matkalla halkaisijan pituudesta eli mallinnettu viivalähde oli 100,8 metriä pitkä. Käyttämällä kaavaa 3 voidaan laskea teoreettinen etäisyys, jolla siirrytään lähikentästä kaukokenttään. Kuvaan 40 on laskettu tämä etäisyys mallinnuksessa käytetylle viivalähteelle. Kuvasta nähdään, että tälle lähteelle lähikenttä ulottuu kuuloalueen alarajalla 20 hertsissä yli 1,1 kilometrin päähän ja kenttä kasvaa logaritmisesti ja ulottuu 200 hertsin kohdalla jo yli yhdentoista kilometrin päähän. Koska mallinnuksen alarajataajuus oli 63 Hz, sijaitsee mallinnetulla taajuuskaistalla kaukokentän raja lähimmillään 3,7 kilometrin päässä äänilähteestä. Näin ollen kaikki tarkastelupisteet sijaitsevat äänilähteiden lähikentässä, jossa viivalähteen tuottaman



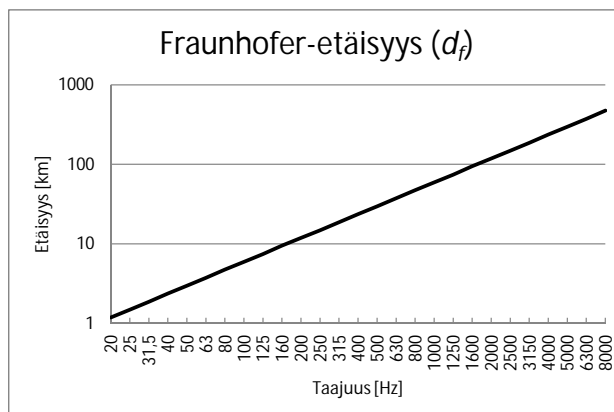
Kuva 38: Nord2000:lla kahden metrin laskentakorkeudella ja impedanssiluokalla E lasketun oletusarvomallinnuksen ja mallinnustilanteiden 1-9 tulosten erotuksen keskiarvo ja keskihajonta.



Kuva 39: Eri impedanssiluokalla ja laskentakorkeudella tehtyjen oletusarvolaskentojen ja mallinnustilanteiden 1-9 tulosten erotuksen keskiarvot.

keskiäänitason tulisi vaimeta kolme desibeliä etäisyyden kaksinkertaistuessa.

Turbulenttisuuden huomioimatta jättäminen mallinnuksessa (mallinnustilanne 2) puolestaan laski laskentatuloksia kaikissa tarkastelupisteissä keskimäärin noin 0,4 desibeliä. Sama vaikutus (0,3 desibeliä) oli tuulennopeuden poistamisella (mallinnustilanne 3), mutta mallinnustuloksissa oli hajontaa eri pisteiden välillä. Tuulennopeuden pieni lisäys (tilanne 5) tai vähennys (tilanne 4) puolestaan eivät vaikuttanut mallinnustuloksiin merkityksellisesti. Suurin vaikutus sääparametrimuutoksella laskentatuloksiin näyttäisi kuvan perusteella olleen mallinnustilanteessa 6, kun mallinnus toteutettiin negatiivisella lämpötilagradientilla. Suuri keskihajonta johtuu tarkastelupisteiden 3 ja 11 mallinnustuloksista. Pisteessä 3 saatiin 2 desibeliä



Kuva 40: Mallinuksissa käytetylle viivalähteelle laskettu lähi- ja kaukokentän rajan määrittävä Fraunhofer-etäisyys.

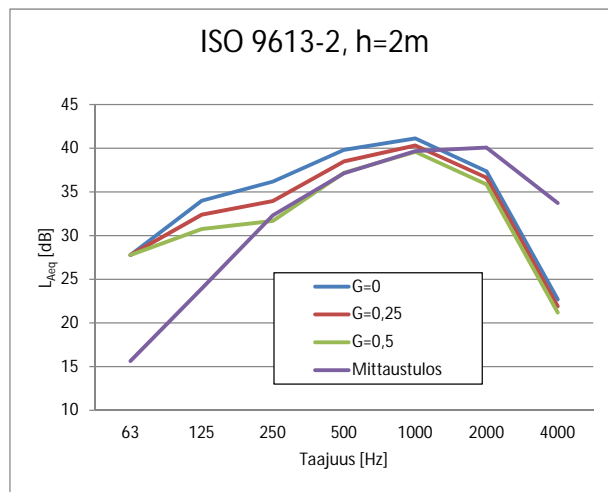
ja pisteessä 11 jopa 4,3 desibeliä pienemmä laskentatulokset negatiivisella lämpötilagradientilla suhteessa gradientin arvoon nolla. Muissa pisteissä mallinnustilanne antoi alle desibelin pienempiä arvoja. Positiivinen lämpötilagradientti (mallinnustilanne 7) puolestaan antoi tasaisesti noin 0,5 desibeliä suurempia mallinnustuloksia kuin oletusarvomallinnus kaikissa tarkastelupisteissä. Maaperän karheustermien muutoksilla (tilanteet 8 ja 9) ei ollut merkittävää vaikutusta mallinnustuloksiin.

Kuvaan 39 on koottu kolmella eri impedanssiluokan ja laskentakorkeuden parametriparilla toteutetu herkkyystarkastelut. Kuvan perusteella voidaan todeta, että sääparametrien käyttäytymisessä ei ollut huomattavia eroja, vaikka laskentakorkeutta tai impedanssiluokkaa muutettiin. Pieniä eroja ilmeni eri lämpötilagradientteilla toteutettujen laskentojen ja oletusarvolaskentojen välillä. Samansuuruisia eroavaisuuksia ilmeni myös laskennoissa, joissa tuulennopeus (tilanne 3) ja turbulentsisuus (tilanne 2) oli nolla.

5.4 Mittausten ja mallinnusten vertailu

Mallinnusmenetelmien vertailun ja sääparametrien herkkyystarkastelun lisäksi suoritettiin mittaustilannetta jäljitteleviä mallinuksia, joilla pyrittiin selvittämään miten hyvin mallinnukset vastaavat mitattua melutilannetta. Mittauspisteenä toimi mallinnusten tarkastelupisteenä käytetty piste numero 4. Mittauspisteen ja lähimpien tuulivoimaloiden välinen etäisyys oli niin lyhyt, ettei tulosten vertailu anna täyttä kuvaa siitä, miten hyvin mallinnusmenetelmät vastaavat todellista tilannetta etenkin pidemmällä etäisyyksillä. Tästä syystä tarkastelussa päätettiin kiinnittää huomiota siihen, miten yhteneväisiä mittauksilla ja mallinnuksella saadut taajuusspektrit olivat. Mallinnusten tavoitteena on kuitenkin selvittää keskiäänitason arvo altistuvassa kohteessa, joten kokonaistasoa ei voida täysin tarkastelussa sivuuttaa. Iso 9613-2 -menetelmällä taajuusspektriä tarkasteltiin oktaavikaistoittain ja Nord2000 -menetelmällä terssikaistoittain.

Mittaustuloksina vertailussa käytettiin 27.2.2013 klo 6-22 ulkoimmissiopisteessä mitattuja terssikaistakohtaisia F-aikapainotettuja ja A-taajuuspainotettuja ekvivalenttitasoja. Mallinnuksessa tuulivoimaloiden tuottaman melun emissiotasona käytettiin saman aikavälin melupäästömittauksen mittaustulosta. ISO 9613-2 -tarkastelua varten mittaustuloksista laskettiin oktaavikaistakohtaiset tulokset.



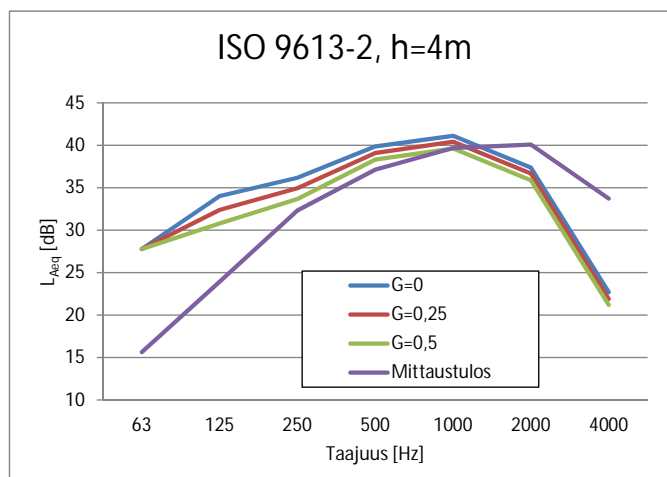
Kuva 41: ISO-9613-menetelmällä kahden metrin laskentakorkeudella saatujen mallinnustulosten ja mittaustuloksen vertailu

ISO 9613-2 -menetelmällä laskettiin mallinnusohjelmavertailun mallinnustilan- teiden 1, 4 ja 5 mukaiset mallinnukset sekä samat mallinnukset käyttäen laskenta- korkeuksia 1,5 metriä ja 4 metriä. Kuvaan 41 on piirretty kahden metrin korkeudella tehtyjen laskentojen antamat keskiäänitasot sekä mitattu taso. Kuvasta nähdään, että maavaimennus vaikuttaa mallinnustulokseen vasta 125 hertsin oktaavikaistalla. oktaavikaistoilla 125 - 1000 Hz mallinnus maavaimennuksella $G = 0,5$ seurailee mittaustulosta parhaiten. Oktaavikaistalla 2000 hertsiä mallinnustulokset ovat vielä melko lähellä mittaustulosta, mutta kaistalla 4000 hertsiä mallinnustulokset sukel- tavat aivan liian jyrkästi suhteessa mittaustulokseen. Vaikka $G = 0,5$ on mallinnuk- sista lähimpänä mittaustulosta usealla oktaavikaistalla, niin keskiäänitasovertailussa $G = 0,25$ on lähimpänä mittaustulosta jääden siitä vain 0,2 dB.

Kuvaan 42 on laskettu neljän metrin korkeudessa tehdyt vastaavat mallinnukset. Kuvasta nähdään, että maavaimennus vaikuttaa jälleen samalla taajuuskaistalla, mutta eri vaimennuksen arvoilla saadut tulokset eivät eroa toisistaan yhtä paljon kuin kahden metrin laskennassa. Jälleen maavaimennus $G = 0,5$ oli keskitaajuuksilla lähimpänä mittaustulosta, mutta $G = 0,25$ antoi A-painotetun keskiäänitason, joka oli vain 0,1 desibeliä suurempi kuin mittaustulos.

Puolentoista metrin korkeudessa tehtyjen mittausten ja neljän metrin korkeudel- ta tehtyjen mallinnusten on todettu vastaavan hyvin toisiaan, kun mallinnuksessa käytetään kovaa tai puolikovaa maanpintaa [61].

Erään tutkimuksen mukaan 8 metrin myötätulessa mitatun ja mallinnetun tuu- livoimapuiston tuottaman melun A-painotetun keskiäänitason tulokset olivat 1,5 dB



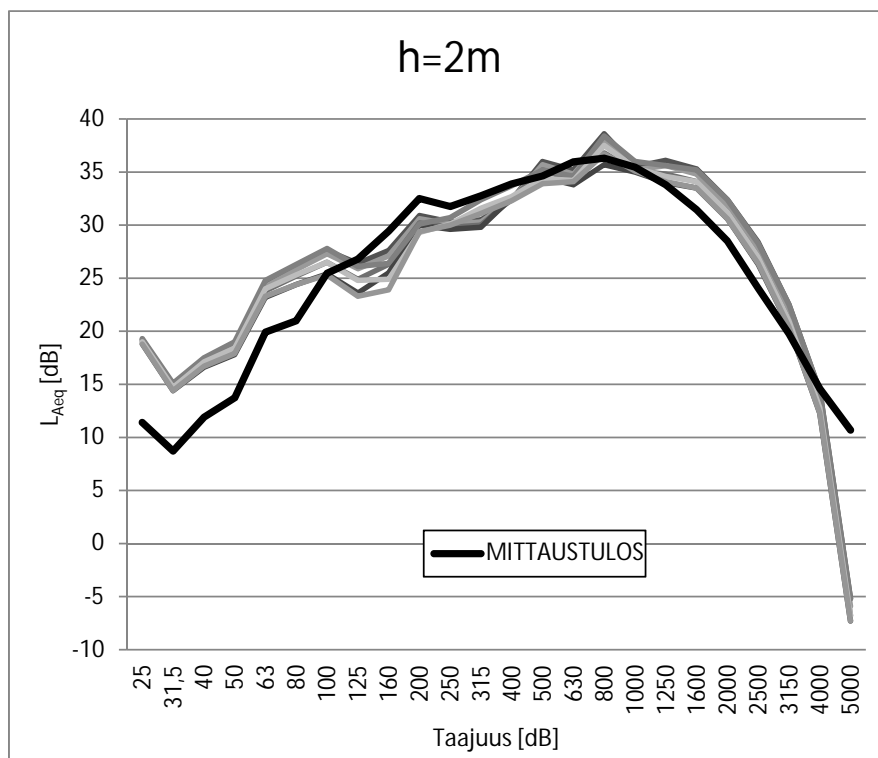
Kuva 42: ISO-9613-menetelmällä neljän metrin laskentakorkeudella saatujen mallinnustulosten ja mittaustuloksen vertailu.

sisällä toisistaan tasaisessa, kumpuilevassa ja kompleksisessa maastossa tarkasteltuna. Ainoat eroavaisuudet mittausten ja mallinnusten välillä havaittiin, kun lähde sijaitsi kummalla havaitsijaan nähden tai kun lähteen ja vastaanottajan välillä oli akustinen este. Tällöinkin mallinnustulos voitiin korjata vastaamaan mittausta yksinkertaisen korjausterman avulla. [62]

Eräässä australialaisessa tutkimuksessa puolestaan käytettiin tuulivoimaloiden melupäästön takuuarvoja ja IEC61400-11 -standardin mukaisesti mitattuja melupäästöarvoja mallinnuksen lähtötietona. Näitä mallinnuksia verrattiin neljässä tuulivoimapuistossa tehtyihin mittauksiin. Mallinnuksessa käytettiin kolmea maavaimennuksen arvoa: 0; 0,25 ja 0,5. Tuulivoimapuistot sijaitsivat tasaisessa tai hieman kumpuilevassa maastossa. Melupäästön takuuarvoa käytettäessä maavaimennuksen arvo 0,5 antoi mittaustuloksia, jotka yliarvioivat immissiopisteiden melua keskimäärin noin 1-2 dB, mitä voidaan pitää hyvänä tuloksena, sillä takuuarvojen tehtävänä on hieman yliarvioida melupäästöä. Kova maanpinta yliarvioi melutasoa altistuvissa kohteissa keskimäärin noin 2-4 dB. Maavaimennuksella 0,5 ja mitatulla melupäästöllä lasketut melumallinnukset antoivat tuloksia, jotka erosivat altistuvien kohteiden mittaustuloksista 0-1,2 dB. Mallinnuksessa käytettyä vastaanottajan korkeutta suhteessa maanpintaan ei ole julkaisussa ilmoitettu. [63]

Nord2000 -mallinnusmenetelmällä tehtiin laskennat samoilla laskentakorkeuksilla kuin ISO-menetelmälläkin. Mallinnukset tehtiin maanpinnan ominaisvirtausvastusluokilla G, F, E ja D. Lisäksi mallinnukset tehtiin luokkien G, E ja D laskennoille huomioiden mittausjaksolla tallennettu tuulennopeustieto. Tuulennopeutena käytettiin mittausjakson aikaista napakorkeudelta mitattujen nopeuksien keskiarvoa 9,2 m/s ja tuulennopeuden keskihajontana arvoa 1,6 m/s. Tuulensuuntana mallinnuksessa käytettiin arvoa 283 astetta, joka oli voimaloiden napakorkeudella mitattujen tuulensuuntien keskiarvo.

Kuvassa 43 näkyy kahden metrin korkeudella mallinnetut A-painotetut keskiäänitasot eri impedanssiluokilla. Kuvasta nähdään, että mallinnustulokset ovat melko

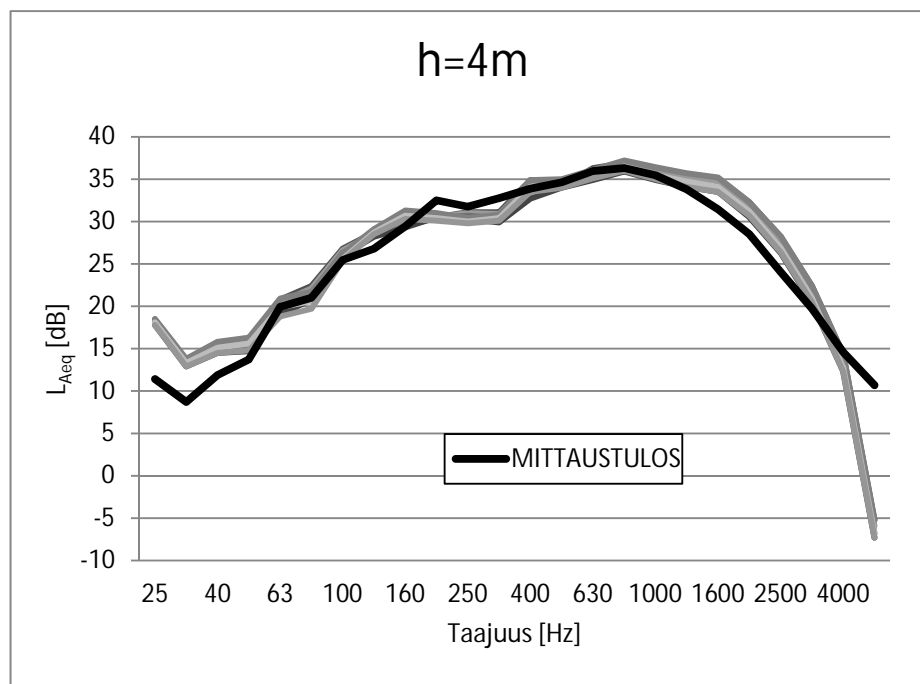


Kuva 43: Nord2000 -mallinnusmenetelmällä kahden metrin laskentakorkeudella saattujen mallinnustulosten ja mittaustuloksen vertailu.

yhteneväisiä mittaustulosten kanssa yli 100 hertsin taajuuksilla. Poikkeuksena terssikaistat 160 - 400 Hz, joissa mallinnustulokset aliarvioivat keskiäänitasoa kaikilla ominaisvirtausvastusluokilla noin 2 desibeliä. Lisäksi terssikaistalla 800 hertsiä pienimmät ominaisvirtausvastusluokat muodostavat kuvaajaan pari desibeliä mittaustulosta suuremman piikin.

Neljän metrin laskentakorkeudella tehdyt mallinnukset näkyvät puolestaan kuvassa 44. Kuvasta nähdään, että mallinnukset seurailevat mittaustuloksen spektriä aina 50 hertsiin asti, mutta sen alapuolella mallinnus yliarvioi matalien taajuuksien osuutta tarkastelupisteessä. Kaiken kaikkiaan mallinnusten taajuusvasteet ovat yllättävän samanmuotoisia kaikilla maanpinnan ominaisvirtausvastusluokilla. Kaikilla laskentakorkeuksilla maanpinnan ominaisvirtausluokka E antoi mittaustuloksia lähimpänä olevia mallinnustuloksia. Luokka E antoi neljän metrin laskentakorkeudella 0,1 desibeliä mittaustulosta suuremman keskiäänitason ja kahden metrin laskennassa 0,1 desibeliä mittaustulosta pienemmän. Tuulen huomioimisella mallinnuksessa ei havaittu olevan suurta merkitystä mallinnustulosten kannalta. Esimerkiksi edellä mainituissa laskennoissa tuulen ja turbulenssin huomioiminen nosti laskentatulosta entisestään, mutta vain 0,1 desibeliä. Näin ollen mittauksia vastaava 44,6 desibelin tulos saavutettiin kahden metrin laskentakorkeudella, luokalla E ja tuulennopeus mallinnuksessa huomioiden. Tämän mallinnuksen taajuusvaste ei kuitenkaan ollut niin lähellä mittaustulosta kuin neljän metrin laskentakorkeudella saatu vaste.

Nord2000 -menetelmän 30 ja 50 metrin korkeuteen sijoitetulla kaiutinlähteellä



Kuva 44: Nord2000 -mallinnusmenetelmällä neljän metrin laskentakorkeudella saattujen mallinnustulosten ja mittaustuloksen vertailu.

myötätuuleen tehdyissä validointimittauksissa saaduissa tuloksissa mallinnuksen ja mittauksen keskimääräinen A-painotetun keskiäänitason erotus oli 0,1 desibeliä ja tulosten keskihajonta 0,7 desibeliä. Mittaukset tehtiin tasaisessa nurmikon peittämässä maastossa aina 1500 metrin etäisyydelle asti. Tuulivoimalalle tehdyissä mittauksissa saatiin mittausten ja mallinnusten välisen erotuksen keskiarvoksi 1 desibeli ja keskihajonnaksi 2,3 desibeliä. Lisäksi mittauksissa todettiin menetelmän toimivan niin tasaisella maalla ja yksinkertaisilla meteorologisilla olosuhteilla kuin myös kompleksisessa maastossa ja kompleksisilla ilmasto-olosuhteilla. Menetelmän todettiin olevan ISO 9613-2 -menetelmää parempi etenkin kompleksisissa olosuhteissa. [64]

Eräs tuore tutkimus on osoittanut, että Nord2000 -menetelmällä tasaisessa maastossa sijaitseville tuulipuistoille saadut mallinnustulokset ovat hyvin linjassa mittaustulosten kanssa. Kuudelle puistolle tehdyissä mittauksissa Nord2000 antoi impedanssiluokalla C keskimäärin noin 0,8 dB mittaustuloksia suurempia mallinnustuloksia, tulosten keskihajonnan ollessa 0,7 dB. Tässä tutkimuksessa ISO 9613-2 -menetelmä puolestaan yliarvioi tasaisessa maastossa melutasoja kovan maanpinnan tapauksessa noin 2,7 dB keskihajonnan ollessa 2,7 dB. Puolikovalla maanpinnalla menetelmä antoi kuitenkin keskimäärin 0,3 dB mittaustuloksia pienempiä arvoja, keskihajonnan ollessa 0,5 desibeliä. [65]

5.5 Mittaustuloksiin perustuvat melulaskennat

Tanskan ympäristöministeriön julkaisemassa ohjeessa [50] annetaan kaksi standardiin ISO 9613-2 perustuvaa menetelmää, joista toisella tuulivoimalan mitatun emissiotason perusteella voidaan arvioida melutasoa ulkoimmissiopisteessä ja toisella pientaajuista melua sisätiloissa. Ohjeen mukaan A-painotettua äänenpainetasoa L_{pA} 1,5 metrin korkeudessa ulkona voidaan arvioida yhtälöllä

$$L_{pA} = L_{WA,ref} + 10 \log(l^2 + h^2) - 11 \text{ dB} + \Delta L_g - \Delta L_a, \quad (27)$$

missä $L_{WA,ref}$ on mittauksilla määritetty tuulivoimalan terssikaistakohtainen A-painotettu emissiotaso, l on voimalan ja laskentapisteen välinen etäisyys, h on voimalan napakorkeus. Yhtälössä näkyvä 11 desibeliä on lähteen suuntaavuudesta ja etäisyydestä aiheutuva korjaus, ΔL_g on maaheijastuksen vaikutus (maalla sijaitseville voimaloille 1,5 dB ja merituulivoimaloille 3 dB) ja ΔL_a on ilmakehän absorption vaikutus ($\alpha_a \sqrt{l^2 + h^2}$).

Taulukko 13: Ilmakehän absorptiokertoimen α_a arvot terssikaistoittain ilmankosteuden ollessa 80 % ja ilman lämpötilan ollessa 10 °C . [50]

| Terssikaista [Hz] | 50 | 63 | 80 | 100 | 125 | 160 | 200 |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| α_a [dB/km] | 0,07 | 0,11 | 0,17 | 0,26 | 0,38 | 0,55 | 0,77 |
| Terssikaista [Hz] | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1000 |
| α_a [dB/km] | 1,02 | 1,3 | 1,6 | 2,0 | 2,4 | 2,9 | 3,6 |
| Terssikaista [Hz] | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 | 4000 | 5000 |
| α_a [dB/km] | 4,6 | 6,3 | 8,8 | 12,6 | 18,8 | 29,0 | 43,7 |

Taulukkoon 13 on merkitty laskennassa käytetyn termin α_a arvot terssikaistoittain. Kun terssikaistakohtaiset A-painotetut keskiäänitasot $L_{pA,i}$ on saatu laskettua, voidaan laskea kokonaisäänitaso $L_{pA,tot}$ yhtälöllä [50]

$$L_{pA,tot} = 10 \log \sum 10^{\frac{L_{pA,i}}{10}}, \quad (28)$$

Näin saadun keskiäänitason $L_{pA,tot}$ laskentaepävarmuus on ± 2 dB [50].

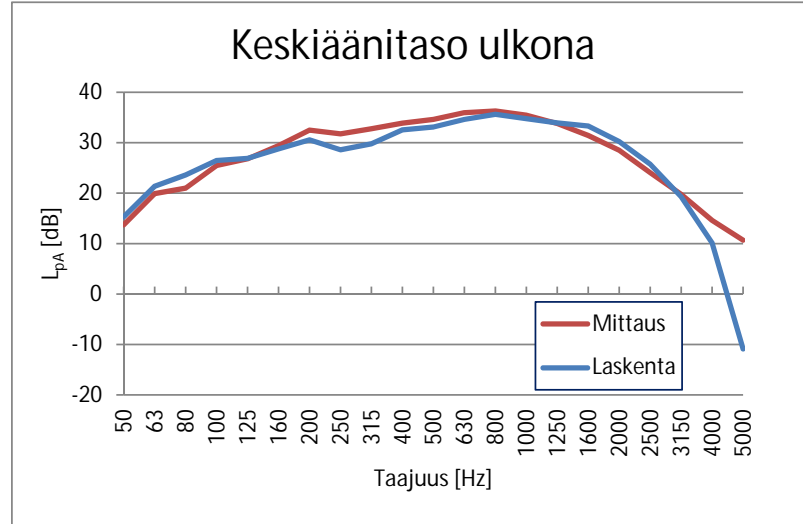
Määritetään ulkomittauspisteessä eli mallinnuksen tarkastelupisteessä 4 edellä kuvatulla laskentamenetelmällä saatava keskiäänitaso. Lasketaan kunkin tuulivoimalan tarkastelupisteeseen 4 tuottamat terssikaistakohtaiset keskiäänitasot edellä esitetyllä laskentatavalla. Voimaloiden etäisyydet on esitetty taulukossa 14.

Laskemalla kunkin voimalan tuottama terssikaistakohtainen A-painotettu keskiäänitaso ja summaamalla tulokset yhteen saadaan keskiäänitaso tarkastelupisteessä. Kuvassa 45 on esitetty saatujen laskentatulosten ja mittaustulosten vertailu. Laskennallinen keskiäänitaso taajuuskaistalla 50 – 5000 Hz oli 43,9 dB, mitatun tason ollessa samalla kaistalla 44,6 dB. Laskentamenetelmä siis aliarvioi keskiäänitasoa hieman mittaustulokseen nähden. Ero on kuitenkin todella pieni.

Pientaajuista sisämelutasoa voidaan arvioida yhtälöllä [50]

Taulukko 14: Tarkastelupisteen 4 ja mittauksen aikana toiminnassa olleiden tuulivoimaloiden väliset etäisyydet

| Voimalan numero | 4 | 3 | 1 | 5 | 8 | 7 | 6 |
|------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Etäisyys voimalaan [m] | 454 | 582 | 888 | 1007 | 1056 | 1093 | 1208 |



Kuva 45: Laskennallisen ja mitatun terssikaistakohtaisen ulkomelun keskiäänitason vertailu.

$$L_{pALF} = L_{WA,ref} - 10 \log(l^2 + h^2) - 11 \text{ dB} + \Delta L_{gLF} - \Delta L_{\sigma} - \Delta L_a, \quad (29)$$

missä l on laskentapisteen ja tuulivoimalan välinen etäisyys, h on voimalan napakorkeus, 11 dB on etäisyydestä ja lähteen suuntaavuudesta aiheutuva korjaus, ΔL_{gLF} on maaheijastuksesta pienille taajuuksille aiheutuva korjaus, ΔL_{σ} on ääneneristävyys pienillä taajuuksilla ja ΔL_a on ilmakehän absorption vaikutus ($\alpha_a \sqrt{l^2 + h^2}$).

Taulukkoon 15 on merkitty pientaajuisen sisämelutason laskennassa tarvittavien termien arvot terssikaistoittain. Määritetään sisämittauspisteessä edellä kuvattulla laskentamenetelmällä saatava keskiäänitaso samaan tapaan kuin ulkomelutason laskenta. Taulukkoon 16 on kirjattu mökin ja mittauksen aikana toiminnassa olleiden tuulivoimaloiden väliset etäisyydet. Kun terssikaistakohtaiset äänitasot on määritetty, kokonaistaso saadaan samalla tapaa kuin ulkomelutason tapauksessakin. Laskentaepävarmuus menetelmää käytettäessä on 2 dB [50]. Kuvassa 46 on esitetty saatujen laskentatulosten ja mittaustulosten vertailu. Laskennallinen keskiäänitaso taajuuskaistalla 12,5 – 160 Hz oli 16,8 dB, kun mittauksella saatu tulos oli samalla kaistalla 13,0 dB. Kuvaajasta nähdään, että laskentatulos mukaillee mitattua tulosta taajuuskaistalla 63 – 160 Hz, mutta tämän taajuuskaistan alapuolella mittaustulos laskee jyrkästi. Laskentatuloksessa näkyy 25 hertsin kaistalla korostuma, joka ilmeni myös melupäästömittauksissa. Sisäimmissiomittausten perusteella tällä taa-

Taulukko 15: Pientaajuisen sisämelun laskennassa tarvittavat maaheijastuksesta aiheutuvat korjaustermit, ääneneristävyys ja ilmakehän absorptiokertoimen arvot terssikaistoittain ilmankosteuden ollessa 80 % ja ilman lämpötilan ollessa 10 °C . [50]

| Terssikaista [Hz] | 12,5 | 16 | 20 | 25 | 31,5 | 40 |
|--------------------------|-------------|-----------|-----------|------------|-------------|------------|
| ΔL_{gLF} [dB] | 6,0 | 5,8 | 5,6 | 5,4 | 5,2 | 5,0 |
| ΔL_{σ} [dB] | 5,9 | 4,6 | 6,6 | 8,4 | 10,8 | 11,4 |
| α_a [dB/km] | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,02 | 0,03 | 0,05 |
| Terssikaista [Hz] | 50 | 63 | 80 | 100 | 125 | 160 |
| ΔL_{gLF} [dB] | 4,7 | 4,3 | 3,7 | 3,0 | 1,8 | 0,0 |
| ΔL_{σ} [dB] | 5,8 | 5,7 | 5,5 | 5,2 | 4,7 | 4,0 |
| α_a [dB/km] | 0,07 | 0,11 | 0,17 | 0,26 | 0,38 | 0,55 |

Taulukko 16: Mökin ja mittauksen aikana toiminnassa olleiden tuulivoimaloiden väliset etäisyydet

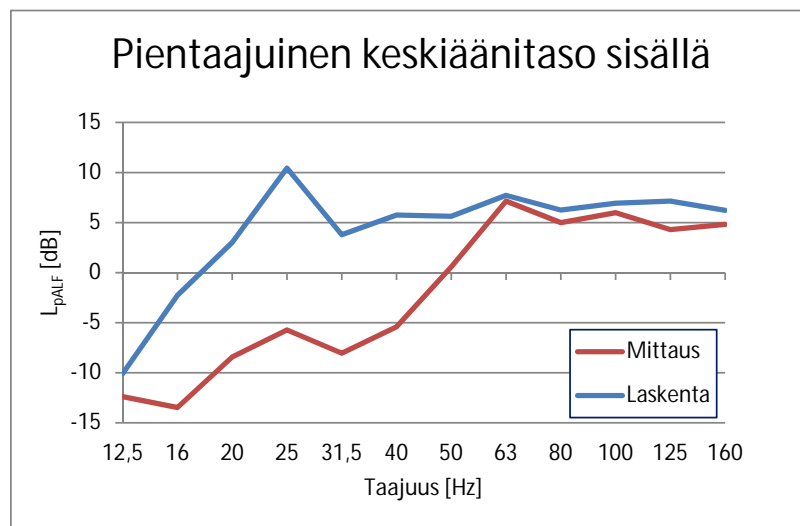
| Voimalan numero | 4 | 3 | 1 | 5 | 8 | 7 | 6 |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Etäisyys voimalaan [m] | 440 | 555 | 890 | 1023 | 1080 | 1096 | 1231 |

juuskaistalla äänitaso on kuitenkin vaimentunut yli 15 desibeliä enemmän kuin mitä laskentatulokseksi saatiin.

5.6 Tuulivoimamelun mallinnuksen yleisiä käytäntöjä

Suomessa tuulivoimamelun mallinnuksessa käytetään yleensä laskentamalleja ISO 9613-2 ja Nord2000. Maanmittauslaitoksen karttapalvelusta [66] on saatavissa koko Suomen kattavat maastotiedot 2,5 metrin välein sijoitetuilla korkeuskäyrillä. Tämä on riittävä tarkkuus käytettäessä laskentamallia ISO 9613-2, mutta ei riittävä mallille Nord2000, kuten tämän työn yhteydessä tehdyissä melumallinnuksissa on havaittu. Tässä työssä tehtyjen mallinnusten perusteella Nord2000:lle tulisi käyttää 1 metrin topografiaresoluutiota.

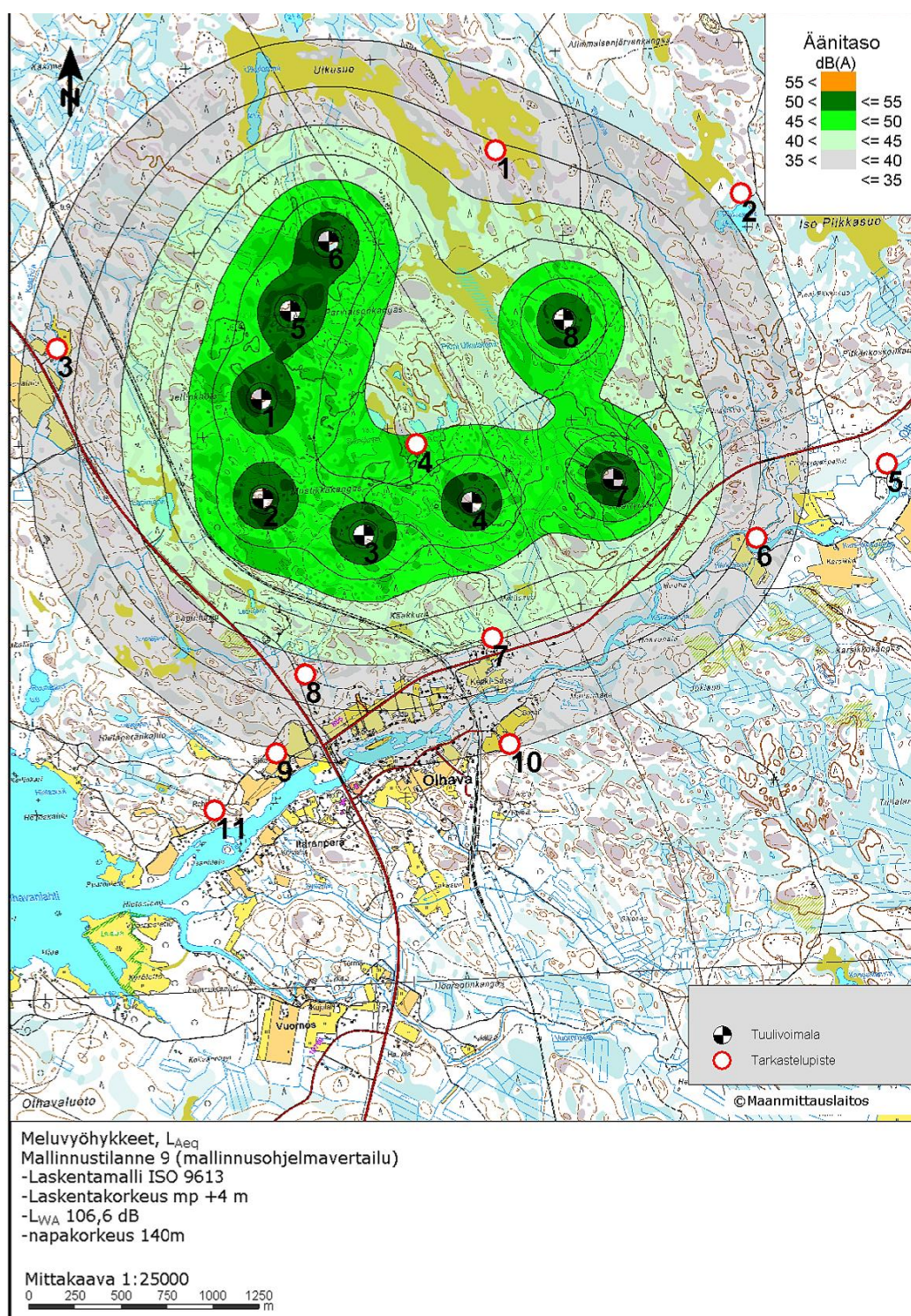
Yleensä tuulivoimamelun mallinnuksessa vesistöt on mallinnettu kovina pintoina ja muut alueet puolikovina. Tässä diplomityössä tehtyjen mallinnusten perusteella voidaan sanoa, että tällainen mallinnus aliarvioi melutasoja jonkin verran. Tuulivoimamelumallinnuksissa on yleensä jätetty rakennukset mallissa huomioimatta. Rakennukset vaikuttavat vain pihapiirin paikallisiin äänitasoihin ja tuovat mallinnuskuviin turhaa hajontaa, joka aiheuttaa maallikoissa ihmetystä ja epätietoisuutta. Rakennusten vaikutuksesta melutasot saattavat näyttää mallinnustuloksissa vaihtelevan ohjearvojen molemmiin puoliin juuri oman pihan kohdalla. Tästä syystä rakennukset ovat mukana mallinnuskuvissa, mutta niiden vaikutus on jätetty mallinnuksessa usein huomioimatta.



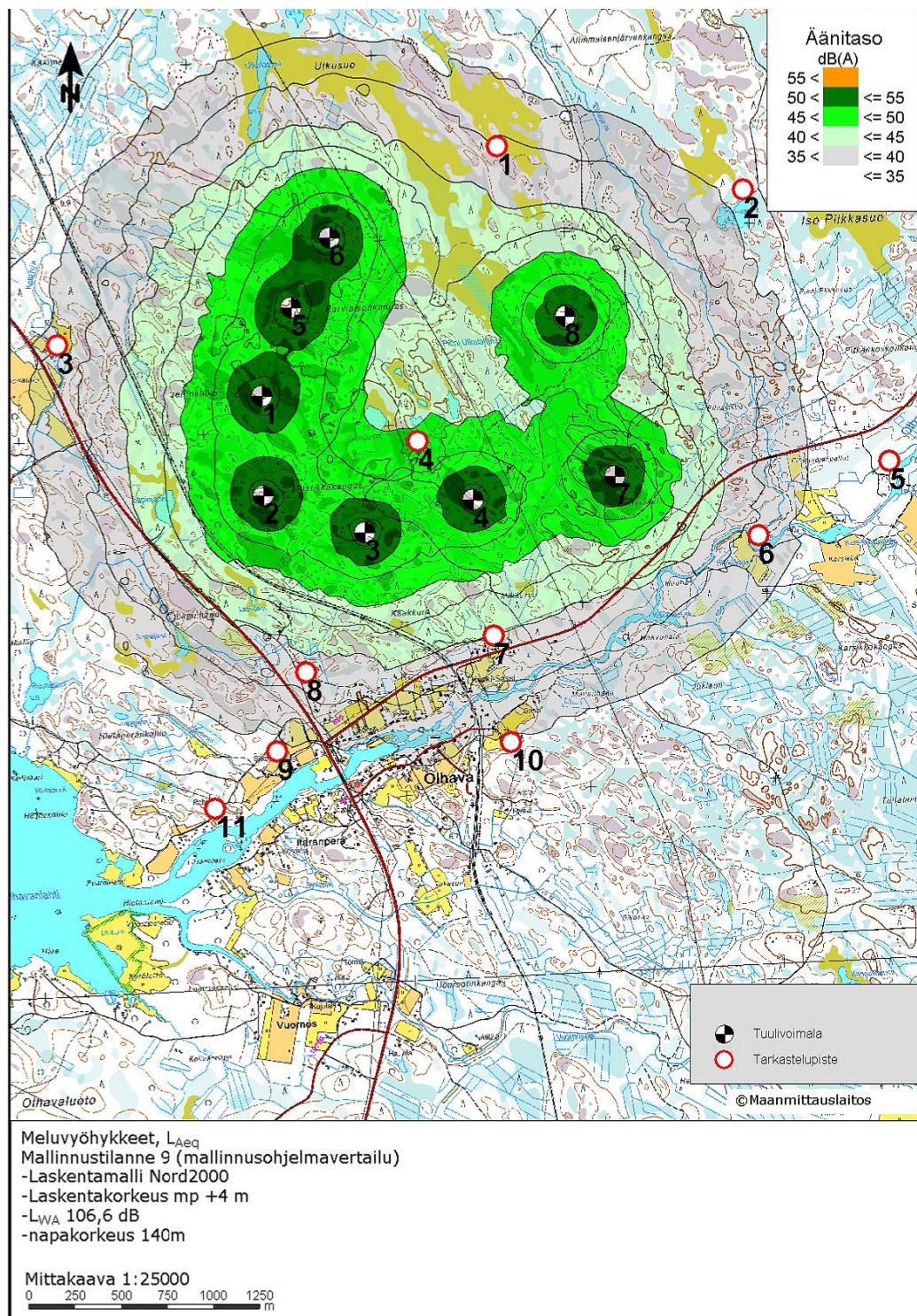
Kuva 46: Laskennallisen ja mitatun terssikaistakohtaisen pientaajuisen sisämelun keskiäänitason vertailu.

Mallinnuksessa tuulennopeutena on yleisesti käytetty arvoa 8 m/s 10 metrin korkeudessa. Tässä diplomityössä tehtyjen mallinnusten perusteella tuulennopeudella on vain pieni vaikutus saatuihin mallinnustuloksiin ainakin käytettäessä laskentamallia Nord2000. Tuulennopeuden arvoa tärkeämpää on käyttää tuulivoimalan melupäästölle mahdollisimman hyvin todellista tilannetta vastaavaa arvoa.

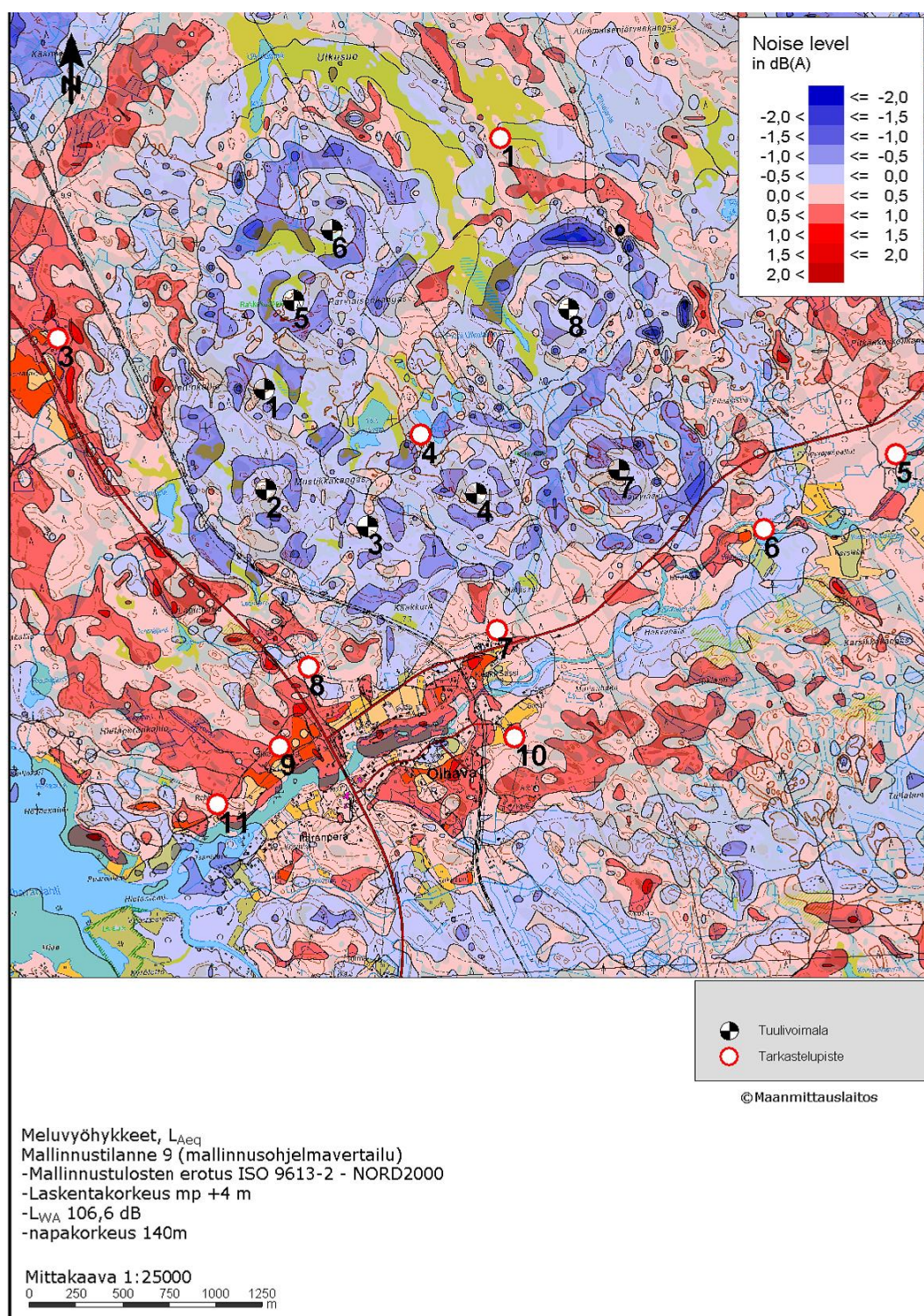
Kuvissa 47 ja 48 on esitetty mallinnusohjelmavertailun mallinnustilanteen 9 meluvyöhykekartat laskettuna molemmilla käytetyillä mallinnusmenetelmillä. Tämä on yleinen tapa esittää saadut melulaskentatulokset havainnollistavassa muodossa. Kuvia vertaamalla näyttäisi siltä, että mallinnustulokset ovat melkoyhtenäisiä ja suurimpana erona on Nord2000 antama melualueiden reunojen "röpelöityminen". Kuvassa 49 on piirretty edellä kuvattujen ISO 9613-2- ja Nord2000 -laskentojen tulosten erotus. Kuvassa sininen väri tarkoittaa, että Nord2000 on antanut suurempia mallinnustuloksia kuin ISO 9613-2 kyseisessä kohdassa ja punainen päinvastaista tilannetta. Kuvasta nähdään, että mallinnusmenetelmien antamien tulosten erotus on lähes koko tarkastelualueella alle desibelin ja usein jopa alle puoli desibeliä. Muutamissa paikoissa ero on suurempi, mutta keskimäärin mallinnustulokset ovat melko yhteneväisiä. Tämä kuitenkin osoittaa, ettei pistelaskennalla tehty menetelmien vertailu välttämättä ole paras mahdollinen tapa vertailla mallinnusmenetelmien eroja. Meluraporteissa tuulivoimamelun leviämistä käsitellään melualueiden avulla. Tästä syystä voisi olla mielekkäämpää tarkastella menetelmillä piirrettyjä melualueita ja niiden eroavaisuuksia. Tämä ei kuitenkaan ole yhtä suoraviivainen tapa lähestyä ongelmaa kuin pistelaskenta, jolla analysoitavaa datamäärää ei paisu yhtä suureksi.



Kuva 47: ISO 9613-2 -mallinnusmenetelmällä neljän metrin laskentakorkeudella saatu meluvyöhykekartta laskentaverkon tiheydellä 50 metriä.



Kuva 48: Nord2000 -mallinnusmenetelmällä neljän metrin laskentakorkeudella saatu meluvyöhykekartta laskentaverkon tiheydellä 50 metriä.



Kuva 49: ISO 9613-2- ja Nord2000 -mallinnusmenetelmillä neljän metrin laskentakorkeudella saatujen mallinnustulosten erotuksen meluvyöhykekartta laskentaverkon tiheydellä 50 metriä.

6 Johtopäätökset

Tuulivoimamelun mittaaminen ja mallintaminen ovat haastavia toimenpiteitä ja vaativat tekijältään runsaasti asiantuntemusta. Melumittaukset edellyttävät sopivia tuuliolosuhteita, joita esiintyy suhteellisen harvoin. Mittaajalta vaaditaan tarkkaa sääennusteiden seuranta ja huolellisuutta mittausajankohdan valinnassa. Mittausdataa tarvitaan laajalta tuulennopeusalueelta, joten mittausten tekeminen edellyttää lähes poikkeuksetta pitkän mittausjakson. Kattavien mittausten tekeminen vaatii myös tarkkoja tuulitietoja mitattavan tuulivoimalan napakorkeudelta mittausjakson ajalta. Tuulensuunnan muuttuminen saattaa muodostua ongelmaksi pitkillä mittausjaksoilla. Amplitudimodulaatio ja pientaajuinen melu tuovat omat haasteensa mittaustulosten analyysiin. Amplitudimodulaation suuruutta ja häiritsevyyttä voidaan arvioida useilla menetelmillä, joista mikään ei ole saavuttanut kuitenkaan selkeää suosiota ylitse muiden. Suhteellisen lyhyen mittausetäisyyden johdosta mittaustuloksissa esiintyi vain laajakaistaista swish-tyypin amplitudimodulaatiota. Näin ollen kapeakaistaisen jyminämaisien amplitudimodulaation tarkastelu jäi tekemättä. Swish-modulaation tarkasteluun parhaiten soveltuvia menetelmiä olivat persentiilitarkastelu sekä spektrogrammit. Pientaajuisen melun analyysi on periaatteessa suoraviivaista, mutta sisätiloissa tehdyissä mittauksissa tulee huomioida mahdollisten huonemoodin synty. Tässä työssä tehdyt melupäästömittaukset eivät olleet riittävän kattavat projektin puitteissa syntyneen ohjeistusehdotelman mukaiseen tuulivoimalan äänitehotason määrittämiseen. Tuulennopeustiedot voimalan napakorkeudelta olivat puutteellisia ja tuulensuunta muuttui mittauksen aikana epäsuotuisaksi. Lisäksi voimalalle ei tehty riittäviä taustamelumittauksia. Samat ongelmat koskevat myös altistuvan kohteen mittauksia. Saadut tulokset ovat siten vain suuntaa antavia.

Tarkastelemalla työssä saatuja pistelaskennan tuloksia voidaan todeta, että mallinnusmenetelmillä ISO 9613-2 ja Nord2000 on mahdollista päästä melko yhdenmukaisiin tuulivoimamelun mallinnustuloksiin. Mallintajan tulee tuntea mallinnusohjelmassa käytettävät parametrit ja niiden vaikutukset mallinnustuloksiin, jotta hän kykenee tekemään hyvin todellisuutta vastaavia mallinnuksia. Eniten mallinnustulokseen vaikuttavat melumalliin määritellyt maanpinnan heijastusominaisuudet. Myös laskentakorkeus ja maastomallin riittävä tarkkuus ovat tärkeässä roolissa. Määriteltävät sääolosuhteet eivät näyttäisi juurikaan vaikuttavan mallinnustuloksiin. Pistelaskennoissa menetelmät antoivat yhteneväisimpiä mallinnustuloksia kun käytettiin neljän metrin laskentakorkeutta ja puoliheijastavaa maanpintaa. Tehdyistä melualuelaskennoista nähdään, että vaikka pistelaskentojen tulokset tässä mallinnustilanteessa olivat melko yhteneväisiä, oli melualuelaskennoissa havaittavissa hie-
man suurempia eroja laskentatuloksissa. Erot olivat kuitenkin suurimmassa osassa tarkastelualueutta alle desibelin luokkaa. Tämä kuitenkin osoittaa, ettei pistelaskennalla tehty menetelmien vertailu välttämättä ole paras mahdollinen tapa arvioida mallinnusmenetelmien eroja. Mallinnusmenetelmiä käytetään yleensä melualueiden piirtämiseen, jolloin yksittäisessä pisteessä saaduissa mallinnustuloksissa tapahtuva muutaman desibelin heitto ei vaikuta mallinnuksen antamaan kokonaiskuvaan. Meluraporteissa tuulivoimamelun leviämistä käsitellään melualueiden avulla. Täs-

tä syystä voisi olla mielekkäämpää tarkastella menetelmien antamia melualueita ja niiden eroavaisuuksia. Tämä ei kuitenkaan ole yhtä suoraviivainen tapa lähestyä ongelmaa kuin pistelaskenta. Tässä työssä tehtyjen melualueelaskentojen perusteella voidaan sanoa, että 11 tarkastelupistettä ei ole riittävän suuri pistelaskennan tarkastelujoukko, vaan tarkkaa analyysiä varten vaadittaisiin huomattavasti suurempi pistejoukko.

ISO 9613-2 -menetelmällä tehdyn mallinnuksen ja mittaustulosten vertailu osoittavat, että mallinnus yliarvioi pieniä taajuuksia ja aliarvioi suuria taajuuksia. Tämän seurauksena maavaimennuksen arvo 0,25 antaa mitattua keskiäänitasoa lähimpänä olevia mallinnustuloksia sekä kahden että neljän metrin laskentakorkeudella, vaikka keskitaajuuksilla mallinnus seurailee mittaustuloksia parhaiten maavaimennuksen arvolla 0,5. Myös Nord2000 yliarvioi pieniä taajuuksia, mutta myös suuria taajuuksia kahden metrin laskentakorkeudella. Keskitaajuuksilla menetelmä hieman aliarvioi melutasoa. Tästä huolimatta taajuusspektri on lähempänä mittaustuloksia kuin ISO 9613-2 menetelmän laskennoissa. Neljän metrin laskentakorkeudella tehdyissä mallinuksissa tulos seurailee mittausten taajuusspektriä todella hyvin. Lyhyellä tarkasteluetaisyydellä mittaustulokset ja mallinnustulokset vastasivat hyvin toisiaan, jos tarkastellaan saatuja kokonaiskeskiäänitasoja. Yksittäisillä taajuuskais-toilla keskiäänitasoissa oli kuitenkin huomattaviakin eroja mittausten ja mallinnusten välillä.

Tanskan ympäristöministeriön antamat menetelmät ulkomelun ja pientaajuisen sisämelutason laskemiseen mitatun emissiotason perusteella vaikuttaisivat käyttökelpoisilta ainakin suuntaa antavien laskelmien tekemiseen. Ulkomelun keskiäänitaso oli laskentamenetelmällä alle desibelin päässä mitatusta tasosta. Taustamelutaso on saattanut jonkin verran kasvattaa mittaustulosta, joten tämä on saattanut aiheuttaa eron mittauksen ja laskennan välillä. Tulos on kuitenkin yllättävän tarkka, sillä laskennassa huomioitiin yhteensä seitsemän toiminnassa olleen tuuli-voimalan tuottaman melutasot, jotka perustuivat vain yhdestä voimalasta tehtyihin emissiomittauksiin. Pientaajuisen sisämelutason arvioinnissa ero lasketun ja mitatun keskiäänitaso välillä oli merkittävä. Pienimmillä taajuuksilla laskentatulos oli huomattavasti mittaustulosta suurempi.

Viitteet

- [1] Tarasti, L. Tuulivoimaa edistämään, Työ- ja elinkeinoministeriö, 2012. Viitattu 28.6.2013. Saatavissa: http://www.tem.fi/files/32699/Tuulivoimaa_edistamaan_A4_lop.pdf
- [2] VTT, Suomen tuulivoimatilastot. Viitattu 23.8.2013. <http://www.vtt.fi/proj/windenergystatistics/>
- [3] Tuulivoimalat YVA-asetuksen hankeluetteloon 1.6.2011, Ympäristöministeriö, 2011. Viitattu 28.6.2013. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=127229>
- [4] Tuulivoimayhdistys, Tuulivoimalaitokset Suomessa. Viitattu 23.8.2013. <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoimalaitokset>
- [5] Ympäristöministeriö, Tuulivoimarakentamisen suunnittelu, 2012.
- [6] Rogers, A. L., Manwell, J. F. ja Wright, S. *Wind Turbine Acoustic Noise*. A white paper, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts, 2006.
- [7] Nobbs, B. Doolan, C. J. ja Moreau, D. J. Characterisation of noise in homes affected by wind turbine noise. *Proceedings of Acoustics 2012*, Fremantle, 21-23.11.2012.
- [8] van den Berg, F., Pedersen, E., Bouma, J. ja Bakker, R. Project WINDFARM-perception Visual and acostic impact of wind turbine farms on residents, 2008.
- [9] Smith, M., Bullmore, A. J., Cand, M. M. ja Davis, R. Mechanisms of amplitude modulation in wind turbine noise. *Institute of Acoustics Wind Turbine Noise Conference*, Cardiff, 26.1.2012.
- [10] Bakker, R. H., Pedersen, E. van den Berg, G. P., Stewart, R. E. Lok, W. ja Bouma, J. Impact of wind turbine sound on annoyance, self, reported sleep disturbance and psychological distress, *Science of the Total Environment*, 2012, vol. 425, s. 42–51.
- [11] Jauhiainen, T., Vuorinen, H. S. ja Heinonen-Guzejev, M. Ympäristömelun vaikutukset, Ympäristöministeriö. 2007.
- [12] Nykänen, H., Uosukainen, S., Siponen, D., Di Napoli, C., Yli-Kätkä, V. ja Ristolainen, J. Ehdotus tuulivoimamelun mallinnuksen laskentalogiikan ja parametrien valintaan, tutkimusraportti VTT-R-04565-13, 2013.
- [13] Eurasto, R ja Nykänen, H. Tuulivoimamelun mittausmetodiikan kehittäminen, tutkimusraportti VTT-R-04680-13, 2013.
- [14] Oerlemans, S. Chapter 2. Primary Noise Sources. Teoksessa: Bowdler, D. ja Leventhall, G. (toim.) *Wind Turbine Noise*. Essex, Multi-Science Publishing Co. Ltd, 2011, s. 13–45.

- [15] Wagner, S., Bareiß, R. ja Guidati, G. *Wind Turbine Noise*. Berlin, Springer-Verlag, 1996.
- [16] Oerlemans, S. ja Schepers, G. Prediction of wind turbine noise directivity and swish, *Proceedings of the Third International Meeting on Wind Turbine Noise*, Aalborg, 17-19.6.2009.
- [17] Friman, M. Directivity of sound from wind turbines. Master's Thesis, Kungliga Tekniska högskolan, Stockholm, 2011.
- [18] Lee, S., Kim, K., Choi, W. ja Lee, S. Annoyance caused by amplitude modulation of wind turbine noise. *Noise Control Engineering Journal*, 2011, vol. 59, nro 1, s. 38–46.
- [19] Zhu, W. J., Heilskov, N., Shen, W. Z. ja Sørensen, J. N. Modeling of Aerodynamically Generated Noise From Wind Turbines. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2005, vol. 127, nro 4, s. 517–528.
- [20] Hessler Jr., G. F. A Note on the Debate about Health Effects from Low Frequency Noise (LFN) from Modern Large Wind Turbines, *Proceedings of the Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise*, Rooma, 12-14.4.2011.
- [21] Jiraska, A. Measurement and assessment of WT noise in the Czech Republic, *Proceedings of the Third International Meeting on Wind Turbine Noise*, Aalborg, 17-19.6.2009.
- [22] Møller, H., Pedersen, C. S. Low-frequency noise from large wind turbines. *The Journal of Acoustic Society of America*, 2011, vol. 129, nro 6, s. 3727–3744.
- [23] van den Berg, G. P. The sound of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise. Ph.D. Thesis, Rijksuniversiteit Groningen, 2006. Viitattu 24.4.2013. Saatavissa: http://dissertations.ub.rug.nl/FILES/faculties/science/2006/g.p.van.den.berg/17_thesis.pdf
- [24] Richarz, W. Wind Turbine Noise Diagnostics, *Proceedings of the Third International Meeting on Wind Turbine Noise*, Aalborg, 17-19.6.2009.
- [25] Kalapinski, E. J. ja Pellerin, T. Wind Turbine Acoustic Modeling with the ISO 9613-2 Standard: Methodologies to Address Constraints, *Proceedings of the Third International Meeting on Wind Turbine Noise*, Aalborg, 17-19.6.2009.
- [26] Rappaport, T. S. *Wireless communications : principles and practice*, Upper Saddle River (NJ), Prentice Hall PTR, 2002, 2. painos.
- [27] van den Berg, F. ja Bowdler, D. Chapter 5. Amplitude Modulation. Teoksessa: Bowdler, D. ja Leventhall, G. (toim.) *Wind Turbine Noise*. Essex, Multi-Science Publishing Co. Ltd, 2011, s. 121–151.
- [28] Bowdler, D. Amplitude Modulation of Wind Turbine Noise. A Review of the Evidence. *Acoustics Bulletin*, 2008, vol. 33, nro 4, s. 31–35.

- [29] McCabe, J. N. Detection and Quantification of Amplitude Modulation in Wind Turbine Noise, *Proceedings of the Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise*, Rooma, 12-14.4.2011.
- [30] van den Berg, G. P. Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, vol. 277, nro 4–5, s. 955–970.
- [31] Moorhouse, A. T., Hayes, M., von Hünenbein, S., Piper, B. J. ja Adams, M. D. *Research into aerodynamic modulation of wind turbine noise: final report*, tekninen raportti, University of Salford, Manchester, 2007.
- [32] Turnbull, C. P. ja Turner, J. P. Measurement of Infrasound from Wind Farms and Other Sources. *Proceedings of the Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise*, Rooma, 12-14.4.2011.
- [33] Jakobsen, J. Infrasound Emission from Wind Turbines. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2005, vol. 24, nro 3, s. 145–155.
- [34] Salt, A. N. ja Liechtenhan, J. T. Responses of the Inner Ear to Infrasound. *Proceedings of the Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise*, Rooma, 12-14.4.2011.
- [35] Bolin, K., Bluhm, G., Eriksson, G. ja Nilsson, M. E. Infrasound and low frequency noise from wind turbines: exposure and health effects. *Environmental Research Letters*, verkkolehti, vol. 6, nro 3. Viitattu 4.12.2012. Lehti ilmestyy myös painettuna. DOI: 10.1088/1748-9326/6/3/035103.
- [36] Bradley, J. S. Annoyance caused by constant-amplitude and amplitude-modulated sounds containing rumble. *Journal of Noise Control Engineering*, 1994, vol. 42, nro 6, s. 203–208.
- [37] Bullmore, A. Chapter 3. Sound Propagation from Wind Turbines. Teoksessa: Bowdler, D. ja Leventhall, G. (toim.) *Wind Turbine Noise*. Essex, Multi-Science Publishing Co. Ltd, 2011, s. 47–99.
- [38] Evans, L. B., Bass, H. E. ja Sutherland, L. C. Atmospheric Absorption of Sound: Theoretical Predictions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1972, vol. 51, nro 58, s. 1565–1575.
- [39] Uosukainen, S. sähköpostiviesti tekijälle, 20.5.2013.
- [40] Lamancusa, J. S. 10. Outdoor Sound Propagation. Verkkodokumentti. Viitattu 17.4.2013. Saatavissa: http://www.me.psu.edu/lamancusa/me458/10_osp.pdf. 2009.
- [41] ISO 9613-1:1993 Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, 1993. 26 s.

- [42] Suomen Tuuliatlas - Tuulisuus Suomessa. Viitattu 18.4.2013. <http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/index.html>
- [43] Hansen, A. Types of Turbulence. Viitattu 18.4.2013. Saatavissa: <http://fuelberg.met.fsu.edu/~ahopkins/MET1010/Turbulence.ppt>
- [44] ISO 9613-2:1996 Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation. 1. painos. 1996. 24 s.
- [45] Plovsing, B. ja Kragh, J. Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction, 2001.
- [46] Delaney, M. E. ja Bazley, E. N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, 1970, vol. 3, nro 2, s. 105–116.
- [47] Plovsing, B. ja Kragh, J. Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 2: Propagation in an Atmosphere with Refraction, 2001.
- [48] IEA Recommended Practises for Wind Turbine Testing and Evaluation. 10. Measurement of Noise Immission from Wind Turbines at Noise Receptor Locations. 1. painos, 1997.
- [49] IEC 61400-11 - Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques, 3. painos, 2012.
- [50] The Danish Ministry of the Environment, Statutory Order on Noise from Wind Turbines, *Translation of Statutory Order no. 1284 of 15 December 2011*, 2011. 14 s.
- [51] Suomen Tuuliatlas. Viitattu 23.8.2013. <http://tuuliatlas.fmi.fi/fi/>
- [52] Randall, G., McCoy, T., Smith, B., Link, H. Applicability of Nacelle Anemometer Measurements for Use in Turbine Power Performance Tests, American Wind Energy Association (AWEA) WINDPOWER 2002 Conference, Portland, Oregon, 2-5.6.2002.
- [53] Ympäristöministeriö, Ympäristömelun mittaaminen. Mätning av omgivningsbuller. Ohje 1/1995.
- [54] Sosiaali- ja terveysministeriö, Asumisterveysohje, Helsinki, 2003.
- [55] DELTA Danish Electronics, Light & Acoustics, EFP-06 project Low Frequency Noise from Large Wind Turbines Final Report. 2010.
- [56] Zwicker, E. ja Fastl, H. *Psychoacoustics: Facts and Models*. Berlin, Springer-Verlag, 1999, 2. painos.
- [57] Lenchine, V. V. Amplitude modulation in wind turbine noise, *Proceedings of ACOUSTICS 2009*, Adelaide, 23-25.11.2009.

- [58] Karjalainen, M. Hieman akustiikkaa. Teknillinen korkeakoulu. 2002.
- [59] Lee, S., Kim, K., Lee, S., Kim, H. ja Lee, S. An estimation method of the amplitude modulation in wind turbine noise for community response assessment, *Proceedings of the Third International Meeting on Wind Turbine Noise*, Aalborg, 17-19.6.2009.
- [60] Møller, H., Pedersen, S., Staunstrup, J. K. ja Pedersen, C. S. Assessment of low-frequency noise from wind turbines in Maastricht. Verkkodokumentti. Viitattu 16.4.2013. Saatavissa: http://vbn.aau.dk/files/62413823/Maastricht_Moeller_et_al_2011.pdf. 2011.
- [61] Bullmore, A., Adcock, J., Jiggins, M. ja Cand, M. Wind Farm Noise Predictions and Comparison with Measurements, *Proceedings of the Third International Meeting on Wind Turbine Noise*, Aalborg, 17-19.6.2009.
- [62] Bass, J. H., Bullmore, A. J. ja Sloth, E. Development of a wind farm noise propagation prediction model. Final Report for EU contract JOR3-CT95-0051. 1998.
- [63] Delairel, C., Griffin, D. ja Walsh, D. Comparison of predicted wind farm noise emission and measurement post-construction noise levels at the Portland Wind Energy Project in Victoria, Australia *Proceedings of the Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise*, Rooma, 12-14.4.2011.
- [64] Søndergaard, B. ja Plovsing, B. Validation of the Nord2000 propagation model for use on wind turbine noise Final Report, 2009.
- [65] Evans, T. ja Cooper, J. Comparison of Predicted and Measured Wind Farm Noise Levels and Implications for Assessments of New Wind Farms. *Acoustics Australia*, 2012 vol. 40, nro 1, s. 28–36.
- [66] Maanmittauslaitoksen karttapalvelu, <https://tiedostopalvelu.maanmittauslaitos.fi/tp/kartta>. Viitattu 10.9.2013.
- [67] Rossing, T. D., Moore, F. R. ja Wheeler, P. A. The Science of Sound, Reading, Addison-Wesley, 3. painos, 2002.
- [68] Harris, C. M. (toim.) Handbook of acoustical measurements and noise control, New York, McGraw-Hill, 1991, 3. painos.
- [69] Lahti, T. Akustinen mittaustekniikka, Otaniemi, TKK, 1997, 2. painos.
- [70] Wikipedia, the free encyclopedia, Sound level meter, http://en.wikipedia.org/wiki/Sound_level_meter. Viitattu 10.9.2013.

A Terminologia

A.1 Äänenpainetaso

Ääniaallot koostuvat hyvin pienistä ilmanpaineen jaksollisista vaihteluista, joihin korvamme reagoivat. Kuulokynnys vaihtelee yksilöiden välillä. Kuulokynnystä kuvaavaksi vertailuäänepaineeksi on kuitenkin standardisoitu arvo 20 μPa , joka kuvastaa kuulokynnystä taajuudella 1000 hertsiä. [67]

Äänenpainetaso L_p saadaan vertailuäänepaineen p_0 ja äänenpaineen p avulla kaavalla [69]

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0}. \quad (\text{A1})$$

A.2 Ekvivalenttitaso eli keskiäänitaso

Ajan mukana vaihtelevan signaalin keskiäänitaso on yhtä suuri kuin vastaavan tasaisen äänen taso samalla mittausjaksolla. Toisin sanoen vaihtelevalla signaalilla on sama äänienergia kuin ekvivalenttitason mukaisella tasaisella äänellä. [68]

Ekvivalenttitaso L_{eq} on siis äänenpainesignaalin tehollisarvon taso, jonka määritelmä on [69]

$$L_{eq} = 10 \lg \frac{1}{T} \int_T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt = 20 \lg \sqrt{\frac{1}{T} \int_T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt}, \quad (\text{A2})$$

missä p^2 on tarkasteltavan äänenpaineen neliö ajan funktiona ja p_0 on edellä esitetty vertailuäänepaineen standardisoitu arvo 20 μPa . Yhtälössä T on aikaintervalli, jonka välein äänenpainetta keskiarvoistetaan. Ekvivalenttitaso ei ole vain äänitason tavallinen keskiarvo. Määritelmän mukaisesta neliöön korotuksesta seuraa, että keskimääräistä suuremmat äänenpaineet korostuvat lopputuloksessa. Näin ollen ekvivalenttitaso korostaa suurimpia hetkellisiä äänitasoja. [69]

A.3 Aikapainotus

Keskiäänitason keskiarvoistukselle on akustiikassa standardoitu kolme aikapainotusta, jotka ovat S-, F- ja I- painotus. Lisäksi huippuarvon ilmaisuun on olemassa aikapainotus nimeltään "peak". F-painotuksen nimi tulee englanninkielisestä sanasta fast, suomeksi nopea. Sen nousuaikavakio on 125 millisekuntia. Mittarilta kuluu aikapainotusta käytettäessä tämä aika, kunnes se saavuttaa herätteen tuottaman tason. Kuuloaistin äänekkyysintegroinnin aikavakio on 100 ms luokkaa, joten F-aikapainotus vastaa parhaiten ihmisen häiritsevyysarviota sekä äänekkyysaistimusta. [69]

A.4 Taajuuspainotus

Taajuuspainotuskäyrien tarkoituksena on jäljitellä ihmisen kuuloaistin herkkyyttä erikorkuisille äänille. Erilaisia käyriä ovat muun muassa A-, B-, C- ja D- paino-

tuskäyrät. Ne perustuvat kansainvälisesti standardoituihin vakioäänekkyysskäyriin, jotka kuvastavat korvan herkkyyttä eri äänen voimakkuuksille ja taajuuksille. Ympäristömelumittauksissa käytetään yleisesti A-taajuuspainotusta, jonka on todettu parhaiten vastaavan melun häiritsevyyttä. Lisäksi se soveltuu hyvin kuulovaurion vaaran arviointiin. [69]

A.5 Äänitasomittari

Äänitasomittari on standardin IEC 61672-1:2002 mukainen äänenpainetason mitauslaite, jolla on kyseisen standardin mukaiset taajuus- ja aikapainotusominaisuudet. Standardi jaottelee äänitasomittarit kahteen luokkaan niiden antaman mittaus-tarkkuuden perusteella. Ykkösluokan mittareissa A-painotetun keskiäänitason mit-taustarkkuus on ± 1 dB ja kakkosluokan mittareilla ± 2 dB. [70]

Ekvivalenttitaso määritetään ympäristömelumittauksissa yleensä integroivalla äänitasomittarilla. Yleinen tapa on tallentaa melun ekvivalenttitasoa sekunnin vä-lein aikapainotuksella F. Äänitasomittareista löytyy usein myös 125 millisekunnin tallennusväli, joka on käyttökelpoinen mitattaessa tasoltaan nopeasti vaihtelevaa me-lua. Myös pidempiä tallennusvälejä on mahdollista käyttää. Haluttu taajuuspainotus (yleensä A-painotus) voidaan tehdä mittausdatalle jälkikäteen terssikaistakohtaises-ti.